ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ БУДІВНИЦТВА, ТРАНСПОРТУ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

“Допущено до захисту ”
Зав. кафедрою АВП
к.т.н., доцент
_____О.К. Дідик
“___“ _____2024 р.

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем вищої освіти

на тему:

«Система регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури»

«System for regulating the microclimate of the soil layer through the temperature channel»

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи АК-23М-1
спеціальності 174 «Автоматизація,
комп’ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»
_____С.О. Мельник
«____»_____2024 р.

Керівник роботи
доц, канд.техн.наук
_____Д.В. Трушаков
«_____»_____2024 р.

Рецензент
доц. каф. ЕТС та ЕМ, к.т.н

_____
«_____»_____2024 р.

м. Кропивницький

Зміст

Вступ 5

1 Призначення та область застосування системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури 7

1.1 Формування вимог користувача до системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури 7

1.2 Призначення системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури 7

1.3 Розробка концепції системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури 9

2 Огляд існуючих рішень та обґрунтування прийнятого принципу побудови виробу 11

2.1 Значимість температури в моделі штучного підігріву ґрунту 11

2.2 Дослідження впливу взаємодії ФАР і крапельного поливу на приріст зеленої маси 15

2.3 Огляд засобів підтримування температури ґрунту 19

2.4 Обґрунтування вибору мікроконтролера 29

2.5 Огляд засобів вимірювання температури 27

2.5.1 Основні характеристики датчиків температури 27

2.5.2 Основні типи напівпровідникових датчиків температури 28

2.5.3 Плівкові напівпровідникові датчики температури 28

2.5.4 Резистивні датчики температури 29

2.6 Обґрунтування вибору засобів індикації 31

2.7 Опис котельної установки 31

3 Опис та обґрунтування обраних проектних рішень автоматизації процесу регулювання температури газону футбольного поля 34

3.1 Опис схеми автоматизації 34
3.2 Опис функцій, які виконує система регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури 40
3.3 Вибір варіанта структури системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури 40
3.4 Вибір закону регулювання температури 41
3.4.1 Регулювання типу "Ввімкнено-вимкнено" 42
3.4.2 Пропорційний регулятор 43
3.4.3 Пропорційно-інтегральний регулятор 45
3.4.4 Пропорціонально-інтегрально-диференціальний регулятор 46
3.4.5 Нечітка логіка 47
3.5 Розробка схем електричних принципових реалізації системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури 48
4 Розрахунки та експериментальні матеріали, що підтверджують працездатність виробу 49
4.1 Рівняння елементів системи 49
4.2 Будова, принцип регулювання та принцип дії САР 51
4.3 Функціональна схема САР 52
4.4. Структурна схема САР 52
4.5 Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння 54
4.6 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи 54
4.6.1 Побудова АФЧХ розімкнутої системи 54
4.6.2 Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи 55
4.6.3 Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи 56
4.7 Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи 57
4.8 Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості. Побудова області стійкості 58

4.8.1 Дослідження системи на стійкість та визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова 58
4.8.2 Дослідження системи на стійкість та визначення області стійкості за методом D-розбиття в площині одного параметра 59
4.9 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи 60
4.10 Побудова перехідного процесу замкнутої системи 61
4.11 Визначення прямих показників якості САР 62
4.12 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї 62
4.13 Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками 65
4.14 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР 66
4.15 Визначення прямих показників якості синтезованої САР 67
5 Опис організації робіт, що пов'язані із застосуванням системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури 68
5.1 Загальні вимоги при монтажі 68
5.2 Монтаж кабельних ліній 69
5.3 Монтаж трубних ліній 70
5.4 Налагоджування системи автоматичного регулювання температури газону 71
Висновки 72
Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів 74
Список літератури 75
Додатки 77

ВСТУП

З кожним роком на сучасних стадіонах все більше уваги приділяється підтримці високої якості газону, що значною мірою залежить від належного регулювання мікроклімату ґрунту. Вибір оптимальної технології для управління мікрокліматом є однією з основних складових, що забезпечують покращення стану газону. Крім того, раціональне використання енергоресурсів дозволяє значно знизити економічні витрати стадіону. Сучасна автоматизована система управління мікрокліматом має не лише підтримувати задані параметри, але й максимально ефективно використовувати можливості виконавчих систем для досягнення найкращих результатів.

На даний момент активно модернізуються стадіони, що супроводжується збільшенням кількості виконавчих систем: поділ контурів підігріву, встановлення систем зашторювання та освітлення. Чим більше таких систем має стадіон, тим важливіше вибрати правильний критерій для стратегії управління мікрокліматом. Одним з найбільш популярних підходів є економія енергоресурсів. У цьому випадку доцільно активно використовувати нижні контури обігріву, оскільки вони мінімально віддають тепло в зовнішнє середовище. Інший підхід полягає в тому, щоб підтримувати вищу температуру в точках росту газону порівняно з рівнем коріння, що передбачає активне використання верхніх контурів обігріву. Ще один критерій управління полягає в тому, щоб нижній контур підтримував постійну температуру в кореневій зоні, так званий оптимум, і лише у разі виснаження ресурсів інших систем можна відхилятися від цієї температури.

Досвід впровадження автоматизованих систем управління показує, що на етапі проектування важко визначити один універсальний критерій управління. Тому система повинна бути гнучкою, дозволяючи оперативно змінювати критерії під час експлуатації. Методи введення таких критеріїв повинні наочно відображати агрономічні, економічні та технічні вимоги до системи. Сучасна система управління повинна не лише забезпечувати вибір одного з основних критеріїв або їх комбінацій, а й дозволяти введення нових критеріїв, які можуть

виникати в процесі експлуатації. Це дасть технологу ширші можливості для оптимального вибору методів підтримання температурно-вологісного режиму газону стадіону, враховуючи змінні умови та вимоги виробничого процесу.

Однією з основних характеристик системи управління є її надійність, оскільки від цього залежить ефективність і стабільність роботи всієї інфраструктури. Тому для апаратної частини системи важливо обрати контролер, який забезпечує захист від можливих збоїв, зокрема зберігає копії основних параметрів роботи в незалежній пам'яті та має механізми для запобігання зависанням і технічним несправностям. Крім того, автоматизована система управління підігрівом газону на стадіоні повинна бути оснащена набором датчиків для точного вимірювання температури ґрунту, що дозволить своєчасно реагувати на зміни в умовах експлуатації. Для передачі керуючих сигналів до виконавчих механізмів система повинна містити блок релейної комутації, що також надає можливість ручного управління в разі необхідності. Така конфігурація гарантує надійну і гнучку роботу системи, здатну адаптуватися до змінних умов та забезпечити стабільну роботу в будь-яких ситуаціях.

Ключовим елементом системи управління є діагностика несправностей та моніторинг її функціональних можливостей. Під час експлуатації можуть виникати непередбачувані ситуації, такі як коливання температури теплоносія, знос або люфт виконавчих механізмів, а також інші обмеження, що впливають на роботу системи. Тому в систему необхідно вбудувати надійні методи діагностики, які здатні виявляти несправності або аномалії, автоматично коригуючи алгоритми управління для підтримки стабільних параметрів мікроклімату газону з мінімальними відхиленнями. Якщо ситуацію неможливо вирішити автоматично без втручання оператора, система повинна сповістити про аварійний стан, надаючи відповідне повідомлення та інструкції для подальших дій. Такий підхід дозволяє забезпечити безперебійну роботу системи та швидке реагування на будь-які проблеми, що можуть виникнути під час її експлуатації.

1 ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ОБЛАСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ ШАРУ ҐРУНТУ ПО КАНАЛУ ТЕМПЕРАТУРИ

1.1 Формування вимог користувача до системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури

Система управління повинна відповідати кільком ключовим вимогам: мати інтуїтивно зрозумілий алгоритм роботи, що не потребує спеціальних знань чи навичок від обслуговуючого персоналу стадіону; бути несуттєвою щодо конструкції дренажної системи газону, з мінімальною залежністю від її характеристик; бути максимально простою в установці та обслуговуванні, а також доступною за вартістю; мати можливість налаштування мікроклімату в залежності від специфічних вимог до вирощуваних культур чи типів газону; забезпечувати надійність і стабільність роботи усіх компонентів системи протягом тривалого часу. Також система повинна мати можливість гнучкого налаштування під різні умови експлуатації та гарантувати безперебійне функціонування за будь-яких змін температури, вологості або інших зовнішніх факторів.

1.2 Призначення системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури

Розроблювана система повинна забезпечувати моніторинг температури газону на полі. Схема футбольного стадіону, оснащеного системами рідинного підігріву газону, наведена на слайді 01.00.

Розташування труб системи підігріву під газоном для натурального і штучного покриття показано на слайді 02.00. У рідинній системі підігріву трубопроводів під газоном важливими факторами є тип газону (натуральний чи штучний) і умови їх прокладки. Глибина закладення труб і відстань між ними визначаються відповідно до конструктивних схем та характеристик шарів покриття. Прокладання труб на діючому натуральному футбольному полі

здійснюється через прорізання канав і протягування труб за допомогою спеціального самохідного обладнання.

Слід передбачити можливість модернізації системи для розширення її функціоналу, зокрема для додавання функції контролю вологості ґрунту. У системі має бути забезпечене зручне керування мікрокліматом ґрунту, а також можливість налаштування різних типів мікроклімату для вирощування різних видів газонних культур.

Система розробляється з метою точного підтримання оптимальних умов для вирощування газонних культур, що сприятиме покращенню якості покриття. Впровадження такої системи дозволить автоматизувати процес підігріву, усуваючи необхідність безпосередньої участі людини в підтриманні потрібної температури ґрунту, а також забезпечить моніторинг змін мікроклімату для захисту насаджень від несприятливих умов, таких як різкі перепади температури або посуха.

Під час включення системи здійснюється аналіз поточних кліматичних параметрів. У режимі налаштування роботи вибирається тип вирощуваного газонного покриття, а в режимі підігріву газону формується керуючий вплив на нагрівальний елемент, коли температура ґрунтового шару опускається нижче рекомендованого рівня. Крім того, система повинна передбачати режим індикації температури.

Під час роботи системи використовуються такі дані: фактичні значення температури та вологості ґрунту, встановлені температурні показники для обраного типу газонного покриття, задані рівні вологості для обраного режиму роботи, а також сигнали індикації температури газону. На основі обробки цієї інформації система повинна генерувати сигнали для виконавчих пристроїв, що відповідають за нагрів.

Під час експлуатації система повинна відповідати низці вимог, зокрема: вона не повинна мати високого енергоспоживання; система повинна живитися від мережі 220 В; бажано передбачити можливість роботи елементів системи в "сплячому" режимі; усі компоненти системи повинні бути захищені від агресивних кліматичних впливів навколишнього середовища.

Система повинна відповідати таким вимогам до метрологічного забезпечення: точність індикації — ±1 °С; діапазон вимірюваних температур — від 0 °С до +50 °С; похибка вимірювань — ±1 °С; вимірювання повинні проводитись безперервно.

Крім того, слід передбачити можливість інтеграції системи в будь-яких умовах розташування стадіону, забезпечити централізоване управління, а також простоту й зручність в експлуатації. При реалізації проекту має бути використана сучасна елементна база.

1.3 Розробка концепції системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури

Після першого включення системи вибирається тип газонного покриття для вирощування. Далі здійснюється вимірювання температури, яка виводиться на індикатор і аналізується. У разі необхідності температура коригується (включається нагрівач). Якщо система має додаткові функції, зчитується вологість ґрунту, проводиться її аналіз, і на основі цього приймається рішення про необхідність поливу.

Кожен режим характеризується своїми параметрами, наведеними в табл. 1.1 [1].

Таблиця 1.1 Характеристики трав для насаджень газонів стадіону

Назва трав	Швидкість укорінення	Густина травостою	Зимостійкість	Опірність до спеки	Опірність до витолочення	Витривалість до низької стрижки	Оптимальні температури ґрунту, ° С
Райграс	5	3	2	1	5	2	15-17,2
Мятлик	1	4	5	4	4	3	12,7-22,7
Мятлик повзучий «Спартак»	3	5	4	3	5	5	6,8-17,2
Овсяниця червона	3	4	4	3	3	4	12,7-22
Овсяниця тросникоподібна	2	3	3	5	4	2	12,7-20
Полевиця	1	5	5	4	2	5	26-28

При перерві між спортивними змаганнями (серіями матчів), що перевищує 14 днів, режим роботи теплообмінників має бути переведений в "економний" режим. Температура теплоносія (розчину або гліколю) на виході з теплових труб не повинна опускатися нижче +3°С, щоб запобігти замерзанню та пошкодженню системи. Управління обігрівом спортивного газону може здійснюватися оператором як вручну, регулюючи роботу системи відповідно до календаря змагань, так і автоматично при наявності додаткових датчиків та приладів для моніторингу температури і вологості. Це дозволяє адаптувати систему до змінних умов і забезпечити оптимальний режим обігріву в будь-який час.

Перепад температури теплоносія (водного розчину гліколю) викликає лінійне розширення або стиснення теплових труб, що проходять по довжині спортивного газону (довжина кожної труби — 112 м). В залежності від точки кріплення теплової труби, ділянки труб можуть подовжуватися або скорочуватися. Для компенсації різниці в лінійних подовженнях теплових труб застосовуються компенсатори: або зменшується діаметр компенсатора на кінцях труб, або змінюється довжина криволінійних дуг. Розташування компенсаторів на кінцях труб, а також послідовне з'єднання кінців суміжних паралельних теплових труб з розподільними та складальними трубопроводами дозволяє ефективно компенсувати теплові деформації. Це забезпечує надійну роботу системи та значно подовжує її термін експлуатації, до 50 років, знижуючи ризик пошкоджень через температурні коливання та механічні навантаження.

2 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИЙНЯТОГО ПРИНЦИПУ ПОБУДОВИ ВИРОБУ

2.1 Значимість температури в моделі штучного підігріву ґрунту

Одним із ключових факторів, що впливають на урожайність рослин, є температура повітря та ґрунту. Як і для овочевих культур, газонні рослини потребують різних температурних умов на різних етапах свого розвитку. Завдяки слабкій кореневій системі молоді рослини потребують нижчих температур і більшого освітлення, оскільки інтенсивність дихання збільшується з підвищенням температури. Різниця між нічними та денними температурами також має значення для підвищення врожайності і приросту зеленої маси. Для нормального розвитку рослин різниця між нічними і денними температурами не повинна перевищувати 3-8 градусів.

Також дуже важливо правильно підтримувати температуру ґрунту. Підвищення температури ґрунту стимулює приріст зеленої маси, що може мати як позитивний, так і негативний вплив. Якщо ґрунт підігрівається під час вирощування ранніх культур, то за умови недостатнього освітлення рослини починають швидше рости, що може порушити баланс між розміром стебла і кількістю квіток. В результаті утворюється потужна підземна частина рослини — коренева система, а плоди розвиваються дуже рано. Однак загальний урожай, зокрема для овочевих культур, може значно знизитися.

Підвищена сонячна радіація може підняти температуру за межі оптимального рівня, що призводить до зниження життєздатності пилку рослин, опіків плодів і листя, а також зміни їх кольору. Дослідження взаємного впливу мікроклімату ґрунту газону і інтенсивності фізіологічно активної радіації проводились як в експериментальному, так і в теоретичному напрямках. Для прогнозування та розрахунку найбільш оптимального співвідношення між цими факторами враховуються результати експериментальних та виробничих досліджень у параметрах теоретичних функціональних залежностей.

Дослідження штучного опромінення рослин, проведені в останні роки, надають достатньо експериментальних даних для аналізу температурної залежності швидкості фотосинтезу. Згідно з результатами цього аналізу, можна зробити висновок, що така залежність має екстремальний характер, а її оптимум підвищується зі збільшенням рівня опромінення до насичуючих значень. Апроксимація експериментальних даних показує, що залежність оптимальної температури від інтенсивності опромінення, хоча й є лінійною, має трьохчленну функціональну форму.

Для практичного застосування така лінійна залежність є досить складною і вимагає значних затрат часу та ресурсів, оскільки потребує постійного моніторингу та коригування параметрів. Подальший аналіз зв'язку між температурою ґрунту та інтенсивністю опромінення в межах до насичуючих значень дозволяє застосувати для апроксимації також показникову функцію, що значно спрощує обчислення і зменшує трудозатрати. Показникова функція забезпечує більш точне моделювання процесів фотосинтезу при різних умовах освітленості та температури, а також дає змогу створити більш ефективні прогнози для агрономічних та екологічних досліджень.

На рисунку 2.1 показана залежність швидкості фотосинтезу на початковому етапі розвитку рослин (1) від температури повітря та фітоопроміненості (E), отримана Свентіцьким І.І. На рисунку 2.2 зображені точки максимальних значень цієї залежності та графік апроксимуючої функції. Припускаючи, що залежність швидкості фотосинтезу (1) від опроміненості має показникову форму, можна записати наступну формулу:

$$dM/dt = C \cdot E^a, \tag{2.1}$$

де dM – елементарна фітомаса, яка утворена за проміжок часу; E – опроміненість; C – коефіцієнт пропорційності; a – показник ступеню.

Після інтегрування виразу (2.1) матимемо вираз для накопиченої фітомаси

$$M = C \cdot E \cdot at. \tag{2.2}$$

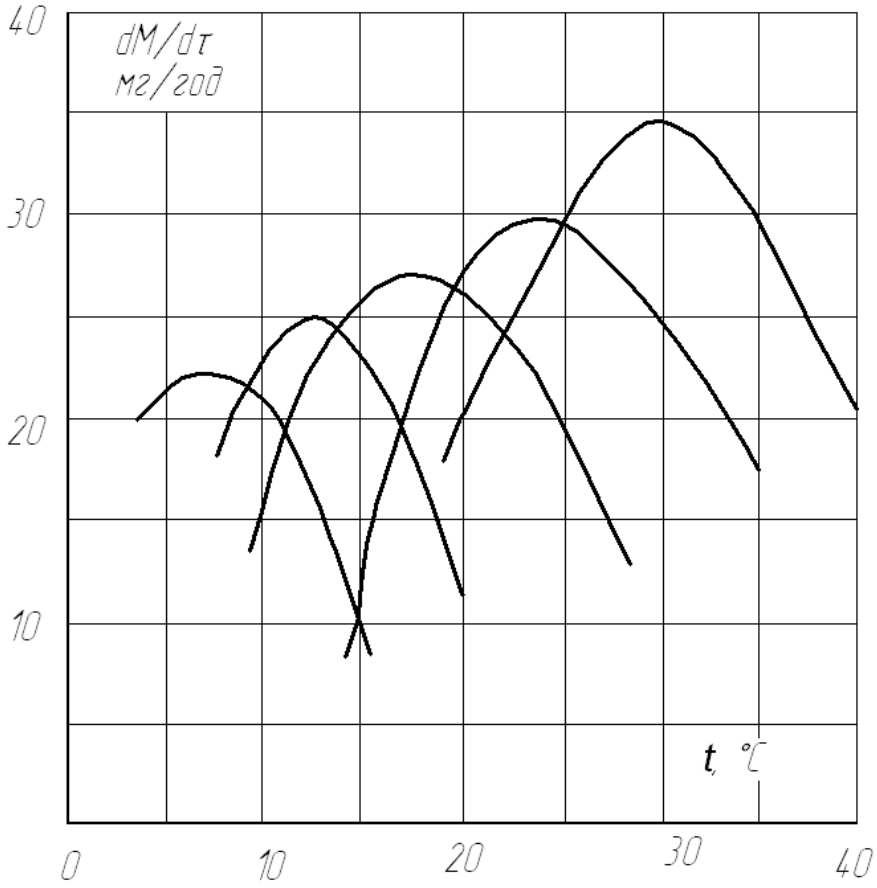


Рисунок 2.1 – Залежність швидкості фотосинтеза від температури і фітоопроміненості Е:
1 – 4 фт/м^2; 2 – 8 фт/м^2; 3 – 12 фт/м^2; 4 – 18 фт/м^2; 5 – 25 фт/м^2

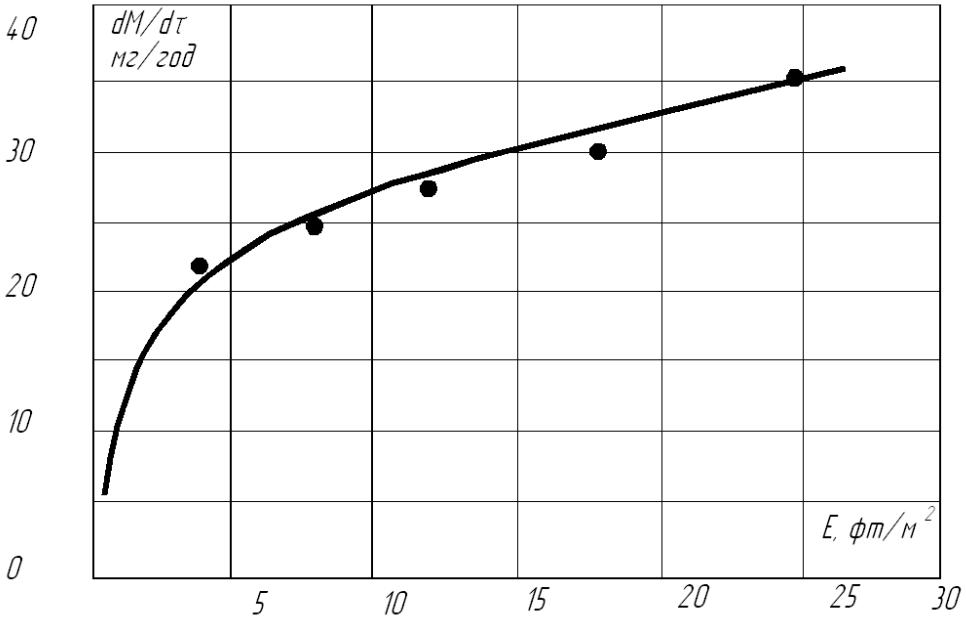


Рисунок 2.2 – Апроксимація ступеневої функції залежності швидкості фотосинтезу від опроміненності

Відсутність показника ступеня при температурі (t) означає, що в такому випадку для всіх варіантів, за однакового часу вирощування та оптимальної температури, величина М залежить лише від рівня опроміненості (Е).

$$M = A \cdot E \cdot a, \tag{2.3}$$

де $A =\cdot C$т – коефіцієнт пропорційності.

Методика визначення показника ступеня «а» через логарифмування зміни фітомаси (або швидкості фотосинтезу) та опроміненості на основі експериментальних досліджень розвитку рослин описана в науковій літературі. Результати розрахунків показника ступеня «а», отримані на основі експериментальних даних, наведені в таблиці 2.1. Середнє значення показника, $\alpha_{ср.}$ = 0,276, може бути використане для розрахунку та побудови апроксимуючої функції (1), яка зображена на рисунку 2.2 при С = 14,396 і швидкості фотосинтезу 35 мг/год.

Як зазначається в аналізованій літературі, оптимізація температури у зв'язку зі зміною фізіологічно активної радіації (ФАР) призводить до ще більшого енергетичного ефекту. Зокрема, при зниженні опроміненості на 50% витрати енергії зменшуються на 47,3%, а тривалість росту збільшується лише на 5,5%. Для вирощування розсади це становить всього два додаткових дні.

Таблиця 2.1 – Результати розрахунків показника ступеня «а»

dM/dτ, мг/ч	35; 30	30; 27,5	27,5; 25	25; 22
Е, фт/м^2	25; 18	18; 12	12; 8	8; 4
а	0,469	0,2145	0,235	0,184
$a_{ср.}$	0,276			

Таблиця 2.2 – Розрахунок апроксимуючої функції

Е, фт/м^2 (эксперимент)	25	18	12	8	4
dM/dτ, мг/ч (эксперимент)	35,0	30,0	27,5	25,0	22,0
dM/dτ,мг/ч (расчет)	35,0	31,96	28,58	25,55	21,10
Погрешность расчета, %	0,0	+6,55	+3,93	+2,22	-4,06

Отже, запропонована математична модель енергетики опромінення рослин на початкових етапах їхнього розвитку показує, що зниження штучної опроміненості, а саме зменшення потужності опромінювальних установок, не лише є доцільним, а й енергетично вигідним. Це особливо важливо при оптимізації температурних умов у зоні вирощування рослин, оскільки дозволяє знижувати енергетичні витрати, зберігаючи при цьому необхідний рівень росту та розвитку культур. Такий підхід забезпечує баланс між економічною ефективністю та біологічними потребами рослин, що сприяє підвищенню загальної продуктивності при меншому споживанні енергії.

2.2 Дослідження впливу взаємодії ФАР і крапельного поливу на приріст зеленої маси

Для оптимального розвитку рослин необхідно регулювати параметри мікроклімату та фізіологічно активного опромінення (ФАР). Особливе значення в цьому процесі мають доза ФАР, а також забезпечення рослин вологою та поживними речовинами. Щоб визначити шляхи оптимізації цих факторів, важливо розглянути, як нарощується зелена маса рослин залежно від цих умов. Зазвичай вважається, що всі біологічні об'єкти розвиваються за «S»-подібною залежністю, відомою в біології як крива Сакса. Академік В.П. Горячкін називав цю криву інтегральною, оскільки за своєю формою вона нагадує графік інтегралу, і по суті її можна отримати шляхом інтегрування основної залежності.

За допомогою кривої Сакса можна розрахувати максимально можливий врожай з урахуванням основних обмежуючих факторів: розміщення основного листового апарату в просторі та створення оптимальних умов для фотосинтезу; підтримання оптимального рівня вологості та забезпечення необхідних поживних речовин у ґрунті; швидкість приросту біомаси та інші фактори. Такий підхід дозволяє визначити не лише добову потребу, але й загальну кількість води, елементів живлення, вуглекислоти, дозу ФАР та інших необхідних ресурсів на

весь період вирощування, що забезпечує формування біомаси та досягнення запланованого врожаю.

В агрономічній практиці використовуються терміни потенціального, біологічного та стандартного врожаїв. Потенціальний врожай (ПВ) визначається як теоретично можливий врожай, який можна отримати за умови наявності достатньої кількості вологи, тепла, необхідної дози ультрафіолетового (УФ) та фізіологічно активного опромінення (ФАР), а також інших факторів, що сприяють росту рослин.

Потенціальний врожай (кг/м^2):

$$У_{ПВ} = \eta_{ФАР} к_м \frac{\sum Q_{ФАР}}{q}, \quad (2.4)$$

де $\eta_{ФАР}$ – ККД фізіологічно активної радіації для конкретної культури за оптимальних умов опромінення;

$\sum Q_{ФАР}$ – сумарна доза ФАР за період вегетації, кДж/м^2;

$к_м$ – Коефіцієнт господарської ефективності врожаю або частка основної продукції в загальній біомасі.;

q – енергетична врожайність — це кількість тепла, що виділяється при спалюванні 1 кг абсолютно сухої біомаси (при більшому вмісті білків цей показник буде вищим), кДж/кг..

Максимальний теоретичний ККД фотосинтезу становить лише 6…8 %. Насправді він значно нижчий, оскільки для рослин неможливо забезпечити оптимальне поєднання всіх агрономічних параметрів (волога, температура, освітленість тощо). Тому фактичний ККД ФАР є меншим і обчислюється за допомогою такої формули:

$$\eta_{ФАР} = \frac{У_B q}{\sum Q_{ФАР}}, \quad (2.5)$$

де $У_B$ – біологічний урожай,

$$У_B = \frac{Q_A}{q}, \quad (2.6)$$

де Q_A – фактично акумульована доза ФАР, кДж/м^2;

q – енергетична врожайність, кДж/кг.

Таким чином

$$\eta_{\text{ФАР}} = \frac{Q_A}{\sum Q_{\text{ФАР}}} \tag{2.7}$$

Коефіцієнт господарської ефективності врожаю:

$$K_{\text{м}} = \frac{\text{Ч}_{\text{Т}}}{\sum \text{а}}, \tag{2.8}$$

де $\sum \text{а}$ – сума частин основної і побічної продукції;

$\text{Ч}_{\text{т}}$ – доля товарної продукції в загальній біомасі (приймають рівною 1).

Зазвичай $\text{К}_{\text{м}}$ приймають рівним 0,387 для біомаси при стандартній вологості 14 % [4].

Сумарна доза ФАР (кДж/см^2) за період вегетації встановлюється за емпіричною формулою

$$\sum Q_{\text{ФАР}} = 0{,}42 \sum S + 0.58 \sum \text{Д}, \tag{2.9}$$

де $\sum \text{Д}$ – сума значень розсіяної радіації; $\sum S$ – сума значень прямої радіації.

З урахуванням всього вище приведеного потенційний врожай буде

$$\text{У}_{\text{ПУ}} = \eta_{\text{ФАР}} \text{К}_{\text{м}} \frac{\sum Q_{\text{ФАР}}}{q} = \frac{\text{Ч}_{\text{Т}} Q_A}{q \sum \text{а}} \tag{2.10}$$

Отже, потенціальний врожай прямо залежить від фактично отриманої та накопиченої рослинами дози ФАР.

При стандартній вологості стандартний врожай біомаси буде

$$\text{У}_{\text{СТ}} = \frac{\text{У}_B}{1 - W_{CT}}, \tag{2.11}$$

де W_{CT} – відносна стандартна вологість.

При нестандартній вологості вираз (2.11) показує фактичний врожай

$$\text{У} = \frac{\text{У}_B}{1 - W_{CT}} \tag{2.12}$$

З урахуванням виразів (2.6), (2.7), (2.12) після перетворень отримаємо залежність вологості ґрунту від дози ФАР, фактично акумульованої рослиною

$$W = 1 - \frac{\eta_{\text{ФАР}} \sum Q_{\text{ФАР}}}{q \text{У}_{\text{СТ}}} = 1 - \frac{\eta_{\text{ФАР}}}{q \text{У}_{\text{СТ}}} \sum Q_{\text{ФАР}}. \tag{2.13}$$

Будемо вважати, що ККД ФАР, У і $\text{У}_{\text{СТ}}$ залишаються постійними.

Таким чином, основна задача проведених досліджень – встановити зв’язок між інтенсивністю крапельного поливу (W) і $\sum Q_{\text{ФАР}}$ для ефективної автоматизації цього процесу вирішена.

Отже, відносна вологість має зворотну залежність від сумарної ФАР, а потенціальний врожай (2.10) пропорційний цій сумарній ФАР. Таким чином, для підвищення врожайності можна збільшувати дозу ФАР при сталому рівні вологості або підвищувати відносну вологість при стабільній опроміненості. Це відкриває додаткові можливості для регулювання врожайності через вплив на два ключових параметри.

Дослідження, проведені в тепличному комбінаті агролабораторією в 2010–2011 роках, а також у 2012 році за участю автора магістерської роботи при вирощуванні огірків, виявили значний вплив підвищення дози ФАР (Д1/Д2) на приріст зеленої маси рослин, особливо на початкових етапах їхнього росту. Експерименти проводилися на спеціально відведених ділянках, де варіювали параметри відносної вологості в межах 10–20 % і потужність опромінення ФАР від 5 до 8 клк.

Одна з реалізацій дослідження відображена на графіках рис. 2.3, де показано, як інтенсивність приросту зеленої маси рослин залежить від стандартної вологості (14 %) та двох доз ФАР протягом 15 днів: Д1 = 8 клк і Д2 = 6 клк.

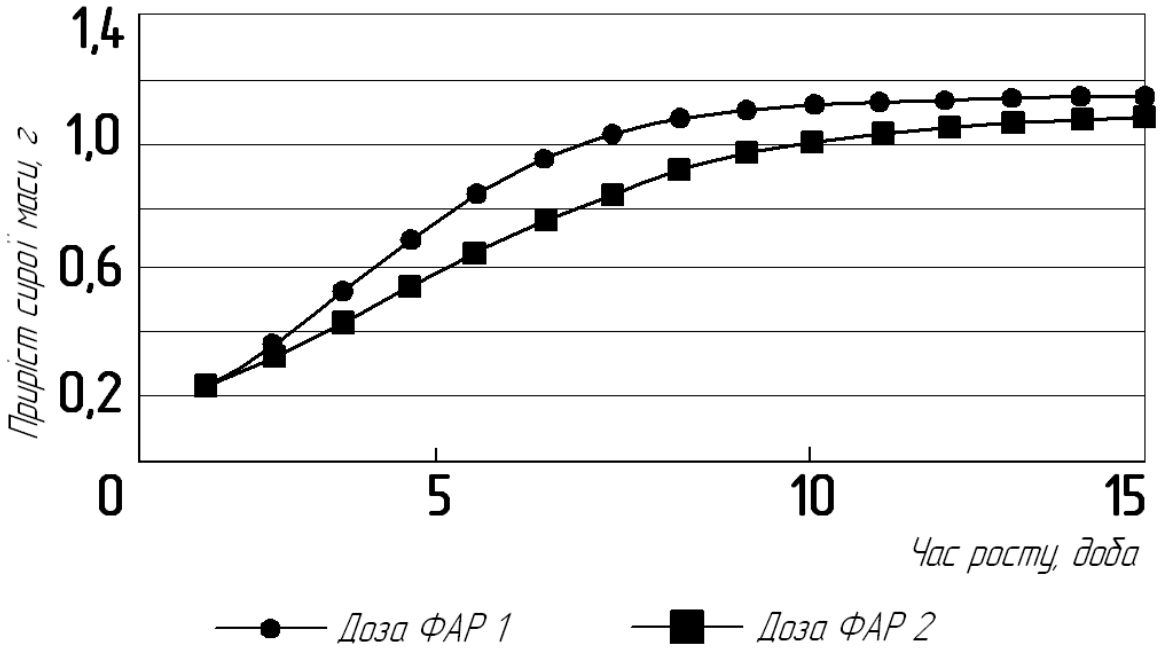


Рисунок 2.3 – Приріст зеленої маси в залежності від дози опромінення

Результати проведених досліджень показують, що значне збільшення приросту зеленої маси та зниження енергетичних витрат можна досягти шляхом оптимізації таких параметрів, як температура, крапельний полив та інтенсивність опромінення ФАР. Комбіноване регулювання цих факторів дозволяє не лише підвищити врожайність, але й ефективніше використовувати ресурси, знижуючи витрати енергії та води, що є важливим аспектом для сталого розвитку аграрних технологій.

2.3 Огляд засобів підтримування температури ґрунту

Спортивні газони, на відміну від декоративних, мають специфічні вимоги. Трав'яний покрив футбольного поля повинен бути рівним, низьким, пружним і витримувати часті стрижки. Він має бути стійким не тільки до погодних умов (морозу, посухи), а й до витоптування. За даними кінозйомки, під час одного матчу на 1 м² поля припадає 130–180 ударних імпульсів, з навантаженням до 200–250 кгс на 1 см².

Трав'яний покрив утворює дерен через свою кореневу систему, яка має бути щільною та добре розвинутою, щоб трава могла відростати після пошкодження. Для забезпечення відповідної якості футбольного поля необхідно підібрати ґрунт з оптимальним механічним складом або створити його штучно, комбінуючи різні фракції та добавки. Крім того, слід вибирати трави, що відповідають ґрунтово-кліматичним умовам місцевості. Рослинний шар на полі має бути однорідним та однакової товщини, а ґрунт — водо- та повітропроникним з достатньою вологоутримуючою здатністю для постачання коренів вологою.

Ґрунти повинні бути структурними, водотривкими, щоб не запливати під час дощів чи поливу, і не утворювати кірки при висиханні. Безструктурні ґрунти, навпаки, при зволоженні стають в'язкими, що знижує фільтруючу здатність верхнього шару. Це особливо важливо для спортивних газонів. Оптимальна суміш ґрунту для таких газонів має баланс піщаних, пилуватих і глинистих часток. Через технологічні вимоги верхній шар газону має бути електропровідним, тому склад ґрунту не можна використовувати для забезпечення електрообігріву.

Існує також система електропідігріву футбольного газону, яка складається з нагрівальних кабелів, закладених під газоном на певну глибину, температурних датчиків та електрощитового обладнання [2].

Система підігріву футбольного газону дозволяє проводити матчі круглий рік, створюючи умови, близькі до літніх. Вона має дренажні властивості, сприяє швидкому відновленню газону після інтенсивного використання, дощів, снігопадів та морозів. Крім того, система формує мікроклімат, що позитивно впливає на спортсменів і покращує атмосферу змагань у пізню осінь та зиму.

Система управління електропідігрівом дозволяє регулювати температуру поверхні нагрівальних кабелів на всьому газоні або його окремих зонах (автоматично чи вручну). Вона працює в діапазоні температур від 10 до 65°С, а час підігріву газону при промерзанні до 1 м становить менше 3 діб. Енергоємність системи досягає 400 кВт, а коефіцієнт корисної дії — 0,95. Однак періодичне включення системи може призвести до виснаження кореневої системи газону через швидке прогрівання ґрунту. Ослаблені рослини не витримують частих коливань температур і можуть загинути, що проявляється у вигляді "жовтих" зон на газоні.

Електропідігрів не враховує особливості теплопровідності верхнього шару футбольного поля та розподілу кореневих систем газонних рослин. Ґрунт, який використовують для вирощування газонів, потребує покращення механічного складу, оскільки він пилуватий і безструктурний. Це призводить до переущільнення посівів під час зрошення або поливу, що негативно впливає на подальшу експлуатацію газону.

Конструкція футбольних полів за світовою технологією включає такі етапи. Спочатку поверхню поля вирівнюють за проектними ухилами та ущільнюють важкими котками з точністю до ± 2 см. Потім на підготовлену основу укладають вологоутримувальний шар торфу (лігніну) товщиною 3-5 см, який ущільнюють котком масою не менше 1,5 т. Торф укладають у зволоженому стані і зберігають його таким до укладання наступного шару. Після цього на торф укладають шар підґрунтя товщиною 16 см у два етапи по 8 см, дотримуючись

проектних ухилів, і нівелюють його по квадратах 2×2 м. Кожен шар ущільнюють котками масою 100-150 кг.

Верхній шар поля складається зі спеціальної суміші: 48% родючої землі з верхнього шару паші, 27% торфу, 5% перепрілого гною (2-річного), 5% гравелистого кварцового піску (діаметр зерен 5-6 мм) і 15% крупнозернистого кварцового піску (2-3 мм). Суміш ретельно перемішують у бетономішалці або вручну. Після укладання шару товщиною 16 см рівномірно розподіляються добрива: азотна крихта, суха кров (250 кг), суперфосфат (200 кг), калій хлористий (120 кг), сульфат амонію (170 кг), аміачна селітра (200 кг), мідний і залізний купорос (по 20 кг кожен). Добрива закладаються граблями на глибину 3-5 см, а поверхню вирівнюють котком масою 300 кг у двох напрямках.

Після укладання підґрунтя товщиною 16 см, приступають до укладання верхнього кореневого шару завтовшки 4 см. Суміш для цього шару складається з: 48% рослинної землі, 16% торфу, 16% перегнилого гною, 15% крупнозернистого кварцового піску (2-3 мм), та 5% гравелистого кварцового піску (5-6 мм). Верхній кореневий шар укладають за нівелювальними відмітками на квадратних ділянках 2х2 м і ущільнюють котком масою 100-150 кг. До цього шару вносять добрива: 200 кг суперфосфату, 10 кг хлористого калію та 150 кг аміачної селітри.

Відомий тип штучної крижаною доріжки включає плити для крижаного покриття з трубною системою, підставу та рухомі опори. Для покращення надійності опор і зручності їх обслуговування, під опори встановлені стовпчасті фундаменти. Кожна опора має пластину з коефіцієнтом теплопровідності від 0,21 до 0,1 ккал/(см•с•°С), яка закріплена на нижній поверхні плити, а опорний елемент з коефіцієнтом тертя 0,05 - 0,03 закріплений на фундаменті [3].

Недоліком конструкції крижаної доріжки є недосконаліть системи труб для подачі охолоджуючого агенту, що призводить до варіацій товщини крижаного покриття в межах 20-85% від номінальної. У цій системі труби під бетонними підставами закріплені вільно, а самі підстави з крижаним і теплоізоляційними покриттями переміщуються через лінійне стиснення при зниженні температури. Така система труб не підходить для використання в підігріві спортивних газонів.

Відомо також, що автомобільна дорога з незамерзаючим бетонним покриттям включає замкнуту систему циркуляції теплоносія у вигляді герметичних Г-подібних труб, розташованих під покриттям. Стійки труб заглиблені в основу дороги, з'єднані з джерелом тепла, розташованим нижче межі промерзання ґрунту. Для покращення ізотермічності та зниження витрат на влаштування покриття, система містить додаткові трубки вздовж крайок дороги, що з'єднують основні труби під покриттям. Пластина прикріплена до труб зверху, а джерело тепла підключене до труби для стічних вод міських комунікацій. Трубки мають спеціальні відгини з потовщеннями, спрямованими назустріч потоку стічних вод. Система має теплоізоляцію та гідравлічний ухил 0,03 - 0,05. Відстань між потовщеннями та петлями труб визначається за спеціальними параметрами. Недоліками конструкції є складність системи циркуляції теплоносія та труднощі з її заправкою.

Відоме обладнання для підтримки технологічного режиму в теплицях включає похило розміщені дренажні труби, обігрівач з насосом і водопідігрівачем, який подає теплоносій у нагрівальні канали. Для зменшення витрат на будівництво, дренаж та обігрів поєднані в одну систему: дренажні труби мають перфорацію на верхній стороні, на входах встановлені регулюючі колодязі, а на виходах — відстійні, з'єднані безнапірним трубопроводом з насосом і водопідігрівачем. Це обладнання малоефективне і працює лише при температурах культурного шару ґрунту вище 11-12°С; при від'ємних температурах система не працює.

Відомий пристрій для обігріву захищеного ґрунту включає теплообмінник у вигляді плоскої тонкостінної гнучкої оболонки з гуми або полімеру, що містить канали для теплоносія і отвори для рослин. Теплоносій, температура якого становить 25-45°С, подається в канали з тиском до 0,1 м вод. ст. Малий температурний перепад вимагає покриття 50-100% поверхні ґрунту в теплиці, що обмежує використання цього пристрою для обігріву спортивних газонів. Для посіву травосумішей ґрунт накочують після посіву катками з тиском 1,2-1,8 кг/см².

Відомий спосіб обігріву ґрунту при поливі передбачає підігрів води та подачу її в зрошувальну мережу з пористими зволожувачами. Для рівномірного обігріву ґрунту та підтримки оптимальних вологості і температури, вода підігрівається після подачі поливної норми, а тиск у мережі знижується до 1,0 - 0,5 м вод. стовпа. Система включає насос, розподільчий трубопровід з манометром, мікропористі зволожувачі типу "Віафло", відвідний трубопровід з вентилем, ємність з підігрівачем та водопровідну лінію з поплавковим клапаном. Зволожувачі закладаються на глибину 7–10 см, з інтервалом 30 см, забезпечуючи рівномірний обігрів верхнього 20 см шару, де знаходяться корені рослин.

Основний недолік зрошувальної мережі полягає в тому, що посів можна проводити лише вузькими смугами. Тому для суцільного посіву трав'яних сумішей цей метод обігріву є непридатним.

Відомий пристрій для дренування та обігріву ґрунту в теплицях містить трубу обігріву, розташовану всередині дренажної труби, що допомагає зменшити втрати тепла та відтавання ґрунту. Однак, на футбольних полях інтенсивність навантаження на 1 м² під час матчу в 103-104 рази вища, ніж на поверхні ґрунту в теплицях. Тому укладання труби обігріву в дренажній трубі під рослинним покривом футбольного поля призведе до значних локальних деформацій, що перевищать допустимі норми (±2 см на 2 м).

Відомий пристрій для обігріву ґрунту включає водяний генератор тепла, замкнутий контур теплоносія та систему автоматичного управління температурою з регулятором і датчиками температури ґрунту та теплоносія. Водяний генератор тепла працює з підігрівачем, а контур включає циркуляційний насос і триходовий перепускний клапан. Система управління ґрунтовою температурою побудована на блок-схемі, що включає елементи порівняння та підсилювач. Однак, недоліком цього пристрою є недостатня точність регулювання температури ґрунту.

Відомий пристрій для обігріву ґрунту включає водяний генератор тепла, замкнутий контур теплоносія та систему автоматичного регулювання температури ґрунту з датчиками температури ґрунту, теплоносія та рівня сонячної радіації. Водяний генератор працює з підігрівачем, а контур включає циркуляційний насос і

два триходових клапана. Система управління передбачає обчислювальний блок, інтегратор, коригуючий блок і два елементи порівняння для точного регулювання температури ґрунту. Однак, недоліком цього пристрою є складність конструкції та низька надійність датчика рівня сонячної радіації, що може призводити до збоїв у роботі всієї системи.

Найближчим аналогом для обігріву спортивного газону є пристрій, що включає первинну систему теплообміну, з'єднану з центральним опаленням міської мережі, та вторинну замкнуту систему циркуляції теплоносія (води або розчину води з глюколем). Теплоносій циркулює через герметичні теплові труби з поліетилену, встановлені в культурному шарі газону. Система включає водопровідні розподільчі і складальні трубопроводи, перекачуючий насос, розширювальний посудину з клапанами, термостат та пристрій для управління в ручному та автоматичному режимах. Під тепловими трубами знаходяться дренажні труби. (Рекламний проспект акціонерного товариства фірми "WIRSBO Linig-System". Motomatic AG fur Fussballfeld).

Теплові труби розміщені в культурному шарі ґрунту на глибині 200-250 мм та з відстанню 250 мм між ними. Вони можуть бути укладені паралельно або перпендикулярно до напрямку футбольного поля. На кінці поля труби з'єднані з водопідвідною та розподільною трубою, а також з відвідною трубою водопровідної системи. Теплові труби діаметром 3/4" укладені групами з трьох ниток і U-подібними колінами на протилежному кінці поля. Відвідні та підвідні труби мають конічну форму з діаметром 160 мм на вході та 110 мм на виході, протяжністю 72 м.

Основні причини, що перешкоджають досягненню необхідного технічного результату при використанні відомого пристрою, це нерівномірний прогрів родючого шару ґрунту та значний перепад температури теплоносія між підвідною і відвідною трубами. U-образні коліна не компенсують лінійне розширення теплових труб при зміні температурного режиму, особливо під час переходу між економним і нормальним режимами. У зимовий період система підтримує температуру теплоносія на рівні +6°С, що викликає постійну циркуляцію рідкого

середовища і зміни температури на виході, але не забезпечує належну експлуатацію труб, оскільки коліна не компенсують температурні коливання.

Запропонована система обігріву спортивного газону дозволяє проводити змагання будь-якого рівня протягом всього року. Підземна система зрошення з дренажною мережею забезпечує збереження рослинного покриву на період 8–10 років.

Отже, викладені дані підтверджують, що описаний підхід відповідає наступним умовам: засіб, що реалізує цей підхід, призначений для використання в будівництві спортивних споруд та газонів; можливість його застосування підтверджена; цей засіб здатний забезпечити досягнення технічного результату.

2.4 Обґрунтування вибору мікроконтролера

Для цього проекту було обрано мікроконтролер з сімейства AVR від Atmel, оскільки вони мають високу швидкодію, хороше співвідношення функціональність/ціна та широкий вибір моделей. Ці мікроконтролери популярні, підтримуються зручними середовищами розробки і мають велику кількість документації, у тому числі українською. Atmel (США) є відомим лідером на ринку мікроелектроніки, спеціалізуючись на пристроях з високошвидкісною пам'яттю, мікроконтролерах та програмованих логічних мікросхемах.

Одним із найбільш перспективних напрямів Atmel Corp. є лінія 8-розрядних високопродуктивних RISC мікроконтролерів AVR, які є потужними та економічними інструментами для створення багатофункціональних і вбудованих контролерів. На сьогоднішній день мікроконтролери AVR мають одне з найкращих співвідношень «ціна-продуктивність-енергоспоживання» серед 8-розрядних моделей на світовому ринку. В Atmel Corp. випускаються три основні серії AVR: «tiny», «classic», «mega».

Мікроконтролери AVR мають широкий спектр застосувань. Для серії «tiny» це інтелектуальні автомобільні датчики, іграшки, ігрові приставки, материнські плати ПК, контролери доступу в мобільних телефонах, зарядні пристрої, детектори диму і полум'я, побутова техніка, пульти дистанційного

керування. Для «classic» AVR використовуються в модемах, сучасних зарядних пристроях, смарт-картах, системах супутникової навігації, складній побутовій техніці, пультах ДУ, мережевих картах, материнських платах ПК, стільникових телефонах нового покоління та промислових системах управління. Серія «mega» застосовується в мобільних телефонах (аналогових і цифрових), принтерах, факсах, ксероксах, дискових накопичувачах і CD-ROM.

Українські фахівці високо оцінили швидкодію і потужну командну систему AVR, наявність двох типів незалежної пам'яті на одному чіпі та розвинену периферію. Важливу роль у цьому відіграє підтримка розробок від Atmel Corp., що дозволяє розробникам сподіватися на стабільну підтримку мікроконтролерів AVR при створенні нових виробів.

Мікроконтролер AVR фірми Atmel є восьмирозрядною однокристальною мікро-ЕОМ з системою команд RISC, що дозволяє виконувати більшість команд за один такт. Вибірка та виконання команди поєднуються завдяки двоступеневому конвеєру, що дозволяє досягти максимальної швидкості. Число виконуваних команд на секунду дорівнює тактовій частоті мікроконтролера.

Мікроконтролери виготовляються за КМОП технологією, мають енергонезалежну пам'ять для зберігання програми та даних (Flash та EEPROM), та відзначаються низьким енергоспоживанням при високій тактовій частоті. Програму і вихідні дані можна записувати безпосередньо в процесі експлуатації (ISP – In-System Programmable).

Сімейство AVR включає три серії мікроконтролерів: AT90 («classic»), ATtiny («tiny») та ATmega («mega»), кожна з яких має кілька типів. Мікроконтролери серії AT90 за характеристиками схожі на AT89 (Atmel) та MCS-51 (Intel), займаючи середнє місце між ATtiny і ATmega. ATtiny мають найменші обчислювальні можливості, тоді як ATmega – найбільші в сімействі AVR.

Мікроконтролери одного типу випускаються в різних варіантах, які відрізняються напругою живлення, максимальною тактовою частотою, типом корпусу та діапазоном температур. Atmel також пропонує програмні та апаратні засоби для підтримки розробок на базі мікроконтролерів AVR.

2.5 Огляд засобів вимірювання температури

2.5.1 Основні характеристики датчиків температури

Кожен датчик, зокрема датчик температури, має низку характеристик, які дозволяють порівнювати різні моделі та обирати найбільш підходящий для конкретних задач. Основні з цих характеристик наведені нижче [12]:

1. Функція перетворення (градуїровочна характеристика) визначає залежність вихідного значення від вимірюваної величини:

$$y = f(x) \tag{2.14}$$

Залежність виражається в визначених одиницях: y – у одиницях вихідного сигналу або параметрах датчика, x – у одиницях вимірюваної величини. Для температурних датчиків це може бути, наприклад, Ом/°С або мВ/°К..

2. Чутливість — це співвідношення зміни вихідної величини датчика до зміни його вхідної величини:

$$S = dy/dx \tag{2.15}$$

3. Поріг чутливості — це найменша зміна вхідної величини, яку можна точно зафіксувати. Він залежить як від властивостей вимірюваної величини, так і від точності процесу її перетворення в датчику.

4. Межа перетворення — це максимальне значення вимірюваної величини, яке може бути виміряне без шкоди для датчика. Верхня межа вимірювання зазвичай на 10% менша за межу перетворення.

5. Метрологічні характеристики визначаються конструктивними та технологічними особливостями датчика, стабільністю матеріалів, що використовуються, а також специфікою взаємодії датчика з вимірюваним об'єктом.

Метрологічні характеристики, в свою чергу, визначають тип і розмір погрішностей вимірювань датчика. Частина погрішностей є випадковими і аналізується за допомогою математичної статистики, в той час як систематичні погрішності можуть бути описані аналітично та усунуті з результатів вимірювань.

Основні види систематичних погрішностей: зміна напрямку вхідної величини (наприклад, нагрівання або охолодження для температурних датчиків);

відмінність умов роботи датчика від тих, при яких визначалась його функція перетворення; нелінійність функції перетворення, властива напівпровідниковим датчикам температури; невідповідність динамічних характеристик датчика швидкості впливу вхідної величини, що коригується коефіцієнтом термічної інерції; нестабільність функції перетворення через старіння матеріалів.

6. Надійність оцінюється в двох напрямках: механічна та метрологічна.

7. До експлуатаційних характеристик належать: маса, габарити, споживана потужність, міцність електричної ізоляції, номінали напруги, а також стійкість до агресивних середовищ, випромінювань, іскробезпечність тощо.

8. Ціна та здатність до серійного виробництва.

2.5.2 Основні типи напівпровідникових датчиків температури

Температура впливає на електрофізичні властивості напівпровідників, змінюючи концентрацію носіїв заряду і, відповідно, електричну провідність. На цьому принципі працюють напівпровідникові терморезистори, а також діоди і транзистори, де зміна концентрації носіїв змінює струм через прилад. Основним недоліком таких датчиків є складність отримання стабільної статистичної характеристики через варіації параметрів транзисторів (коефіцієнт підсилення, опір бази, струм витоку тощо).

Ключовою характеристикою для широкого застосування термодатчиків на основі транзисторів і діодів є стабільність їхніх параметрів. Дослідження стабільності термодатчиків, зокрема на основі транзисторів з температурозалежним параметром – прямою напругою на p-n переході, показують, що в перший рік експлуатації погрішність виміру може становити (0,01...0,15)°С, а в другий рік – (0,002...0,04)°С [14].

2.5.3 Плівкові напівпровідникові датчики температури

Поліпшити характеристики та спростити конструкцію напівпровідникових термодатчиків можна, використовуючи чутливі елементи з тонких плівок напівпровідника на підкладці з діелектрика чи напівпровідника. Виготовлення

таких датчиків здійснюється масовими методами планарної технології, що дозволяє досягти високої точності номінальних опорів і використовувати лазерні методи для їх підгонки. Основним недоліком датчиків на автоепітаксиальних структурах «кремній на кремнії» та з дифузійними кремнієвими тензорезисторами є низька верхня межа робочих температур, оскільки при температурах понад 410–430°С погіршуються ізолюючі властивості p-n переходу [14].

2.5.4 Резистивні датчики температури

Завдання отримання точних результатів вимірювання температури зазвичай вирішується за допомогою резистивних датчиків температури (РДТ), які представлені на ринку в різних конструкціях і з різними точнісними характеристиками. Вони є одними з найбільш стабільних і точних датчиків, що працюють у діапазоні від -200 до 800 °С, і використовуються там, де важлива повторюваність результатів і висока точність вимірювань. Принцип роботи РДТ базується на зміні електричного опору металів при зміні температури, що і стало основою їх створення.

Опір відрізка проводу пропорційний його довжині та обернено пропорційний площі поперечного перерізу:

$$R = \rho L / A \tag{2.16}$$

де ρ – питомий опір матеріалу.

Кожен метал має характерний питомий опір, який можна визначити експериментально. РДТ виготовляють з металів, чий опір збільшується зі збільшенням температури. В межах певного температурного діапазону питомий опір зростає лінійно з підвищенням температури:

$$\rho_t = \rho_0 \alpha[1 + (t - t_0)] \tag{2.17}$$

де ρ_0 – питомий опір при стандартнии температурі t_0, α – температурний коефіцієнт опору ($°C^{-1}$); ρ_t – питомий опір при температурі t.

Теоретично будь-який метал можна використовувати як датчик температури, але ідеальний метал має володіти певними властивостями: стійкістю

до корозії, високою температурою плавлення, лінійною характеристикою R = F(t) та довговічністю.

Платиновий провід хоч і тендітний, але має високу стійкість до забруднення та лінійну характеристику, що робить платину ідеальним матеріалом для РДТ. До її переваг належать хімічна стабільність, легкість отримання у чистому вигляді та висока повторюваність електричних властивостей. РДТ виготовляють із сплаву IEC/DIN (американський стандарт) або хімічно чистої платини (європейський стандарт). Різниця полягає в чистоті: за стандартом IEC/DIN платина може містити домішки металів платинової групи, тоді як європейський стандарт вимагає чистоту не менше 99,99%. Наприклад, при опорі 100 Ом при 0 °C, датчик за стандартом IEC/DIN при 100 °C матиме опір 138,5 Ом, а датчик по європейському стандарту — 139,02 Ом.

Міжнародними комітетами встановлені стандартні криві для РДТ, що визначають середній температурний коефіцієнт α, який характеризує нахил функції R = F(t) в діапазоні температур від 0 до 100 °C. Датчики бувають двох типів: дротові та тонкоплівкові. Дротові датчики виготовляються шляхом намотування дуже тонкого платинового проводу на котушку до досягнення опору 100 Ом, після чого котушка вставляється в керамічне оправлення для запобігання коротким замиканням і забезпечення вібростійкості. Цей процес є трудомістким і виконується вручну під мікроскопом.

Тонкоплівкові датчики виготовляються методом осадження тонкого шару платини або її сплаву на керамічну підставу з подальшою підгонкою опору до необхідного значення. Для забезпечення вологостійкості елементи покриваються склом чи епоксидною смолою. Перевагою тонкоплівкових датчиків є можливість отримання високим опором при менших розмірах порівняно з дротовими. Використовуються двопровідні або чотирипровідні схеми підключення датчика до вимірювального пристрою. Двопровідна схема підходить для коротких проводів, де незначні похибки вимірів є допустимими. Трипровідна схема дозволяє зменшити помилки від струму в проводах, а чотирипровідна забезпечує найкращу точність вимірювання.

Струм збудження проходить через одну пару проводів, а вимір опору — через іншу, що усуває похибки, пов'язані з опором проводів. Хоча цей метод дорожчий за трипровідну конфігурацію (особливо при довгих лініях зв'язку), він забезпечує найвищу точність вимірювання.

2.6 Обґрунтування вибору засобів індикації

У системі потрібно візуально відображати поточну температуру ґрунтового шару та обраний режим роботи. Для цього використовуються семисегментні індикатори. Оскільки температура ґрунту може бути від’ємною, для коректної візуалізації необхідно вибрати щонайменше трирозрядний семисегментний індикатор.

2.7 Опис котельної установки

Сучасна котельня є складною технічною установкою, що складається з котельного агрегату (в даному випадку пропонується використання агрегату ДКВР-20-13) та допоміжного обладнання. Основною продукцією котельного цеху є насичений водяний пар необхідних параметрів для технологічних процесів, а також гаряча вода.

Котельний агрегат складається з парового котла, топки, водяного економайзера, обмурівки та арматури. Котел типу ДКВР-20-13 — це вертикально-водотрубний двобарабанний паровий котел з природною циркуляцією. Він має два барабани однакової довжини та діаметра, а камера згоряння повністю екранована трубами. Для підвищення економічності роботи котел оснащений чавунним водяним економайзером, що дозволяє знижувати температуру відхідних газів.

До допоміжного котельного устаткування належать тягодуттьові та живильні пристрої, обладнання для водопідготовки, паливоподачі, системи шлакозоловидалення та золоуловлювання, а також контрольно-вимірювальні

прилади і автоматизація. Основним паливом є попутний нафтовий газ, а резервним — мазут.

Насичений водяний пар використовується для технологічних потреб основних цехів, а гаряча вода надходить у систему господарсько-питного водопостачання для побутових потреб. Процес отримання пари відбувається таким чином: живильна вода подається відцентровими насосами в барабан котла під тиском 14 кгс/см², що вищий за тиск пари. Спочатку вода проходить через економайзер, де підігрівається до температури на 40°С нижчої за температуру насиченої пари (приблизно 190°С). Барабан котла розподіляє воду і збирає пару. За допомогою опускних труб вода потрапляє в нижні колектори, до яких приєднуються вертикальні екранні труби, що встановлені по стінках топкової камери. Екранні труби не тільки генерують пару, але й захищають стінки камери від високих температур. Під час променевого нагріву вода в трубах закипає, утворюючи пароводяну суміш, що рухається в напрямку барабана котла. Завдяки різниці тиску між пароводяною сумішшю в екранних трубах і водяним стовпом в опускних трубах утворюється природна циркуляція в замкнутій гідравлічній системі котла.

Продукти згоряння спочатку охолоджуються в котельній камері котла ДКВР 20-13, передаючи тепло екранним трубам, а потім охолоджуються конвекцією в економайзері. Димові гази з топки, що мають температуру 360°С і розрядження -0,94 кПа, відсмоктуються димососом і проходять через економайзер, де їх температура знижується до 200°С перед викидом через димову трубу в атмосферу. Для нормального горіння палива в топку подається повітря вентилятором.

У топку котла подається паливо температурою +5°С з витратою 1500 нм³/год, тиском газу до заслінки 3,8 кПа, після заслінки — 3,7 кПа, а тиск повітря складає 1,9 кПа. У барабан котла подається живильна вода, а відбирається насичена пара з витратою 10-20 т/год. Регулювання процесів горіння і подачі води зводиться до контролю подачі палива, повітря, тяги та води. Спосіб регулювання горіння залежить від методу спалювання палива та конструкції топки. Подача

води в барабан регулюється таким чином, щоб рівень води залишався на середньому рівні барабана, що забезпечує максимальне пароутворення і підвищує продуктивність котла.

Отже, проаналізувавши відомі засоби підтримання температури ґрунтового шару, методи вимірювання температури та нагрівання води, можна зробити висновок, що найбільш подібним до запропонованого об'єкта є пристрій для обігріву спортивного газону. Цей пристрій включає первинну систему теплообміну, з'єднану з центральним опаленням міської мережі, а через теплообмінник — з вторинною автономною замкнутою системою циркуляції теплоносія (води або водного розчину з гліколем). Вона виконана у вигляді герметичних теплових труб з структурного поліетилену, встановлених з заданим кроком у культурному шарі під рослинним покривом газону. Теплові труби з'єднані водопровідними трубопроводами змінного діаметра, виготовленими з висококонденсованого поліетилену, а також теплообмінником первинної системи, подвійним насосом, розширювальним посудиною з клапанами для заповнення та продування, клапанами регулювання проходу рідини, термостатом і пристроєм управління, що працює в ручному та автоматичному режимах. Крім того, під тепловими трубами, нижче культурного шару ґрунту, розташовані дренажні труби для забезпечення ефективного відведення вологи та підтримання оптимальних умов для росту рослин.

Завдяки такій конструкції, система забезпечує рівномірний розподіл тепла по всій площі газону, що дозволяє підтримувати стабільну температуру ґрунту навіть в умовах низьких температур. Це сприяє покращенню умов для росту трав'яного покриття, а також запобігає утворенню льоду чи снігових шарів на поверхні. Автоматичне регулювання температури та контролювати її рівень через термостат дозволяє мінімізувати енергетичні витрати, а також підтримувати оптимальний баланс вологості в ґрунті, що важливо для здоров'я рослин. Крім того, така система має високу ефективність і надійність завдяки використанню матеріалів з довгим терміном служби та стійких до агресивних зовнішніх факторів.

3 ОПИС ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ОБРАНИХ ПРОЕКТНИХ РІШЕНЬ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ГАЗОНУ ФУТБОЛЬНОГО ПОЛЯ

3.1 Опис схеми автоматизації

Котельні агрегати типу ДКВР використовуються для виробництва пари, яка застосовується в промислових процесах, для опалення та гарячого водопостачання. Процес отримання пари включає два основних етапи: спочатку вода підігрівається до температури кипіння, а потім кипить, переходячи з рідкої фази в насичений пар.

Тепло, необхідне для процесу, виділяється під час згоряння палива в котельній камері. Передача тепла від продуктів згоряння до нагрівальних поверхонь відбувається через різні види теплообміну: радіаційний, конвективний і теплопровідний. Параметри для контролю, автоматичного регулювання, сигналізації та блокувань визначаються відповідно до вимог СНиП II-35-76 "Котельні установки", розділ 15 «Автоматизація».

Точки контролю:

1а, 2а, 2б - необхідно контролювати температуру та витрату газу, що подається в котел, для точного обліку витрати палива та аналізу ефективності роботи парогенератора;

3а, 5а - контроль тиску газу перед і після заслінки необхідний для визначення наявності тиску в трубопроводі, а також для участі в процесі опресовування газопроводу перед пуском котла;

4а - контроль тиску пари в барабані котла необхідний для запобігання його перевищенню допустимих значень;

9а - температуру мазуту слід контролювати, оскільки він стає транспортабельним через трубопроводи до котла тільки при температурі вище 90°С;

10а - витрату мазуту на котел слід відстежувати та аналізувати, щоб визначити, скільки енергоносія використовуються для виробництва заданої кількості пара;

11а, 12а - температуру підшипників вентилятора необхідно контролювати, щоб запобігти їх перегріву та несправності вентилятора;

13а - контроль тиску повітря перед пальниками необхідний для забезпечення оптимального процесу горіння та запобігання відриву полум'я;

14а - контроль розрядження в топці котла необхідний для забезпечення належної тяги димососа;

16а - температуру відхідних газів до економайзера слід контролювати, щоб уникнути його перегріву гарячими топковими газами;

17а - розрядження димових газів до економайзера контролюється для забезпечення оптимальної тяги димових газів;

18а - розрядження димових газів після економайзера контролюється, щоб мінімізувати втрати розрядження, яке використовується для проходу газів через перегородки економайзера та обігріву живильної води;

19а - температура димових газів перед димососом контролюється для забезпечення оптимальних умов роботи димососа;

20а, 21а - температуру підшипників димососа слід контролювати, щоб запобігти їх перегріву та можливому виходу з ладу димососа;

22а - температура димових газів після димососа контролюється для запобігання виникненню парникового ефекту;

23а - тиск води перед економайзером контролюється для забезпечення надійності та цілісності трубопроводів подачі води;

24а - температура води перед економайзером контролюється з метою забезпечення її оптимальної подачі, щоб уникнути перегріву і надмірного підігріву в економайзері;

25а - температура води після економайзера контролюється для визначення, до якої температури вона була підігріта в економайзері перед подачею в барабан;

26а - витрату пари від котла потрібно контролювати для оцінки паропродуктивності котлоагрегату та підтримки матеріального балансу між подачею води та витратою пари;

27а - тиск пари на виході з котла контролюється для запобігання пориву паропроводу через підвищення тиску;

28а - температура пари на виході контролюється для забезпечення її відповідності заданим параметрам;

29а, 31а - рівень води в барабані котла — ключовий параметр, що впливає на паропродуктивність. Для забезпечення точності контролю застосовуються два датчики;

30а - витрату води в барабан котла необхідно контролювати для забезпечення відповідності між подачею води в котел та випуском пари з котла.

Точки сигналізації:

7а - тиск газу після заслінки сигналізує про відхилення тиску газу від норми, що дозволяє запобігти згасанню факела пальника;

8а - тиск мазуту на котел контролюється з метою сигналізації про перевищення максимально допустимого тиску, щоб захистити обладнання та запобігти розливу мазуту;

11а, 12а - сигналізація температури підшипників вентилятора призначена для запобігання перегріву, що може призвести до пошкодження підшипників та вала димососа;

15а - розрядження в топці котла: зниження розрядження впливає на процес горіння факела, що може призвести до його згасання і, як наслідок, зупинки котла;

20а, 21а - сигналізація температури підшипників димососа необхідна для запобігання їх перегріву та пошкодженню підшипників і вала димососа;

40а - тиск повітря для горіння: зниження тиску призводить до згасання факела, а підвищення — до відриву полум'я і накопичення газу в топці, що може спричинити вибух..

Точки регулювання:

4в, 4д - регулювання тиску газу або мазуту необхідне для підтримання стабільного тиску пари в барабані котла;

5в - регулювання тиску повітря необхідне для забезпечення оптимальних умов горіння газу в топці;

14в - регулювання розрядження в топці необхідне для підтримки стабільних умов роботи котла. Надмірний тиск в топці може призвести до витікання газів і полум'я в приміщення котельні. З іншого боку, занадто велике розрідження збільшує потік повітря, що погіршує економічність роботи котла через втрати тепла з відхідними газами та підвищує споживання електроенергії для тяги;

29в - регулювання рівня води в барабані котла необхідне для забезпечення оптимальної паропродуктивності котла.

Блокування обладнання.

Для парових котлів, що працюють на газоподібному або рідкому паливі, повинні бути передбачені автоматичні системи, які припиняють подачу палива при: зниженні тиску рідкого палива (окрім котлів з ротаційними пальниками), підвищенні/зниженні тиску газу, зниженні тиску повітря (для котлів з примусовою подачею), зменшенні розрідження в топці, згасанні факелів, зміні рівня води в барабані та несправностях ланцюгів захисту.

Вибір датчиків для вимірювання технологічних параметрів залежить від фізичної природи параметра, діапазону вимірювання, точності, умов навколишнього середовища, типу вихідного сигналу (аналоговий/цифровий) і вартості. Аналізуються технічні характеристики різних датчиків, що підходять для конкретного вимірювання. Основним параметром для контролю в процесі виробництва пари є температура, для вимірювання якої використовуються платинові термометри завдяки їх точності та широкому діапазону. Для передачі інформації потрібні додаткові перетворювачі і електрична енергія. Такі прилади належать до електричної гілки ГСП, оскільки вони мають високу чутливість, точність і забезпечують довгий зв'язок та велику пропускну здатність каналів

передачі інформації. Тому систему автоматизації буде побудовано в рамках електричної гілки ГСП.

Первинним перетворювачем температури на позиціях 1а, 9а, 11а, 12а, 16а, 19а, 20а, 21а, 22а, 24а, 25а, 28а є платиновий термоперетворювач ТПТ-1-3 100П, який характеризується високою точністю і широким діапазоном вимірювання температур. Він використовується без вбудованого перетворювача опору типу «таблекта», оскільки в умовах котельні, яка є «гарячою», такий перетворювач не витримує високого теплового навантаження і часто виходить з ладу.

Як перетворювач опору та термоЕРС на позиціях 1б, 9б, 11б, 12б, 16б, 19б, 20б, 21б, 22б, 24б, 25б, 28б використовується модульний вимірювальний перетворювач ІПМ 0399/М0 фірми «Елемер». Він має компактний розмір, встановлюється на DIN-рейку і пропонує широкий вибір первинних перетворювачів температури, напруги та струму. Переналаштовується через ПК на будь-який діапазон вхідних температур. На виході забезпечує сигнал по струму або напрузі. Завдяки хорошій уніфікації та взаємозамінності, цей перетворювач підходить для використання на всіх зазначених позиціях.

2б — перетворювач перепаду тиску Rosemount 3051 CD від компанії "Emerson". Він застосовується для вимірювання витрати газу. Пристрій вирізняється високою точністю, простотою монтажу та експлуатації. Завдяки наявності HART-протоколу, можливе дистанційне обслуговування датчика, а також переналаштування діапазону вхідного перепаду та вихідного сигналу. Особливістю є здатність працювати в межах 5% від діапазону комірки без втрати точності вимірювання. Наприклад, якщо комірка має діапазон 6,2 кПа з точністю 0,1%, переналаштування на діапазон 0,31 кПа зберігає точність на рівні 0,1%.

Для вимірювання тиску газу до і після заслінки (поз. 3а та 5а) використовується датчик тиску Vegabar 52 німецького виробництва "Vega". Ці датчики вирізняються доступною ціною, високою якістю матеріалів, відмінними експлуатаційними характеристиками та можливістю вибору класу точності (0,075; 0,1; 0,2). Одна з особливостей — підсвічування дисплея, яке можна вмикати або

вимикати залежно від умов освітлення. Крім того, датчики оснащені HART-протоколом для дистанційного налаштування.

Для вимірювання тиску пари в барабані котла (поз. 4), тиску мазуту (поз. 5б), тиску води (поз. 22а) та тиску пари від котла (поз. 26а) використовується датчик тиску Vegabar 17. Цей датчик відзначається компактними розмірами та широким діапазоном вимірювання тиску до 600 бар. У виконанні з мембраною рівня прилад може працювати без необхідності в розділових судинах.

Для вимірювання витрати мазуту (поз. 9а) застосовується масовий витратомір Optimass 7300 компанії "Krohne". Цей витратомір є прямотрубним, що дозволяє зменшити його габарити. Він постачається з детальною інструкцією з монтажу та експлуатації російською мовою. Прилад має два аналогових виходи, імпульсний вихід та підтримує протокол HART. Для зручності налаштування та експлуатації дисплей витратоміра оснащений підсвічуванням.

Для вимірювання розрядження димових газів до і після економайзера (поз. 16 і 17а відповідно), а також тиску повітря перед пальниками (поз. 12) використовуються датчики Vegabar 52.

Витратоміри Rosemount 8800D використовуються для вимірювання витрати води на котел (поз. 29а) та витрати пари від котла (поз. 25а, б). Вони мають високу точність (0,5%) та надійність, дозволяючи замінити сенсор без демонтажу корпусу та зупинки потоку. Завдяки високим температурами (приблизно 180°С) на трубопроводі, витратомір має рознесену конструкцію: чутливий елемент встановлюється на трубопроводі, а перетворювач — поруч, в більш прохолодному місці, з'єднані коаксіальним кабелем.

Для вимірювання розрядження в топці котла (поз. 13) використовується датчик перепаду тиску Rosemount 3051CD. Він має відмінні характеристики для малих розряджень і напорів, з точністю 0,2%.

Для сигналізації таких параметрів, як тиск газу після заслінки поз.6, розрядження в топці котла 14а та тиск повітря перед пальниками поз.35а, використовуються цифрові контрольні прилади ВКЦ-1105. Вони монтуються на щиті розпалювання поруч з котлом. Прилади мають цифрову індикацію, два

релейних виходи та струмовий вихід. Також ці прилади можна перепрограмувати на будь-який діапазон в межах основного. У порівнянні з шкальними приладами НМП52 та ТНМП52, ВКЦ-1105 відрізняються високим класом точності 0,5.

Для контролю наявності полум'я на поз. 32а, 33а, 34а використовуються датчики полум'я ДМС-100. Ці оптичні датчики-реле призначені для селективного виявлення відсутності або наявності полум'я в рідкопаливних горілчаних пристроях та подачі сигналу до автоматичних систем. Вторинний перетворювач ДМС-100 монтується на щиті розпалювання.

3.2 Опис функцій, які виконує система регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури

Для розробки структурної схеми системи регулювання температури газону футбольного поля надаємо короткий опис основних функцій, які має виконувати система:

1. Ініціалізація та запуск системи.
2. Вибір оптимального режиму регулювання температури.
3. Отримання та обробка даних з датчиків згідно з алгоритмом.
4. Виведення поточних значень температури ґрунту газону.
5. Формування вихідних сигналів для активації пристроїв нагрівання.

3.3 Вибір варіанта структури системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури

Згідно з вимогами технічного завдання та функціями, які має виконувати розроблювана система, можна визначити основні модулі, що її складають:

1 Датчики є ключовим елементом системи, оскільки вони забезпечують її здатність у реальному часі реагувати на зміни зовнішніх параметрів згідно з розробленим алгоритмом. На ринку представлено широкий асортимент різноманітних датчиків, серед яких є й вузькоспеціалізовані моделі. Оскільки ми

проектуємо систему для стадіонів, ми обмежимося використанням одного типу датчика температури. Проте при виборі пристрою управління слід врахувати можливість підключення додаткових датчиків для уточнення даних або розширення функціональних можливостей системи.

2 Пристрій управління є основним елементом системи, який відповідає за збір та обробку даних від датчиків, генерування керуючих сигналів для виконавчих пристроїв, а також виведення інформації на індикаційний пристрій.

3 Пульт керування та пристрій візуальної індикації потрібні для вибору типу мікроклімату та відображення поточної температури шару ґрунту газону.

Згідно з визначеними функціями, можна сформувати загальну структуру системи. Структура системи регулювання мікроклімату ґрунтового шару за температурним каналом зображена на слайді 04.01 графічної частини. Пристрій управління отримує дані від датчиків температури та задавачів, обробляє їх відповідно до алгоритму (04.02) і передає інформацію на індикатори для відображення температури. За необхідності, він також генерує сигнали для ключових елементів, які керують увімкненням/вимкненням виконавчих пристроїв відповідно до порядку, встановленого в алгоритмі.

3.4 Вибір закону регулювання температури

Спочатку розглянемо загальну схему будь-якої системи регулювання, яка зображена на рис. 3.1. Почнемо з вхідного параметра, що задає бажане значення регульованої величини. Від нього віднімається фактичне виміряне значення цього параметра, що дозволяє отримати сигнал помилки — різницю між бажаним і реальним значенням. Потім регулятор формує вихідний сигнал для коригування навантаження, щоб досягти заданого значення, тобто мінімізувати сигнал помилки до нуля. Далі розглянемо різні типи регуляторів температури.

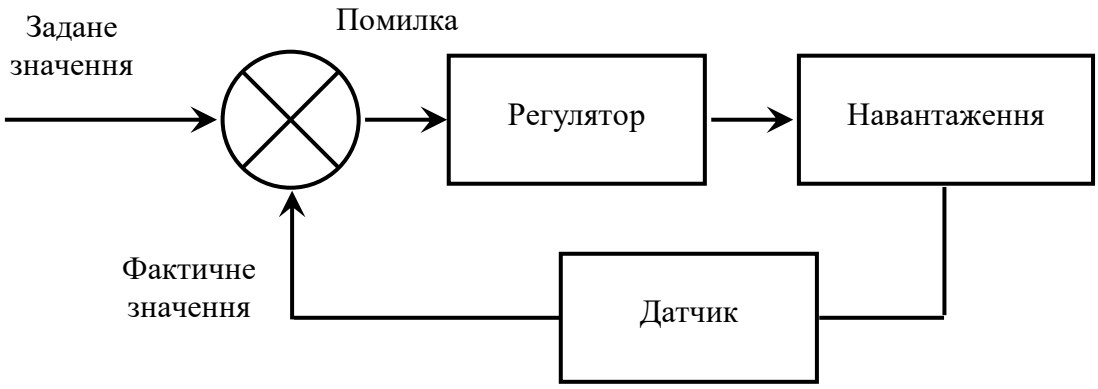


Рисунок 3.1 – Загальна схема системи регулювання

3.4.1 Регулювання типу "Ввімкнено-вимкнено"

Найпоширеніший тип регулятора температури — це двопозиційний регулятор типу "Ввімкнено/Вимкнено", який широко використовується в системах обігріву, печах, холодильниках тощо. У цьому регуляторі є два задані температурні значення: одне, при якому нагрів включається на 100%, і інше, при якому він повністю вимикається. Якщо швидкість зміни фактичної температури є незначною порівняно з ефектом регулювання в системі нагріву або охолодження, крива зміни температури виглядатиме, як на рис. 3.2, де температура коливається між двома граничними значеннями з мінімальними відхиленнями від встановлених значень або зовсім без них.

У шарі ґрунту стадіону, як вже згадувалося, існують значні часові затримки в вимірювальному контурі, які потрібно враховувати. Температура змінюватиметься не зовсім так, як на наведеному графіку. У цьому випадку температура буде зростати, як і раніше, і нагрівач, що регулює задану зону, вимкнеться, коли покази датчика досягнуть верхньої встановленої межі. Однак замість миттєвого припинення передачі тепла, воно продовжуватиме надходити ще деякий час через перехідний процес. Внаслідок цього температура може перевищити нормальну точку відключення регулятора, що може призвести до негативних наслідків, включаючи можливу загибель трав'яного покриву газону.

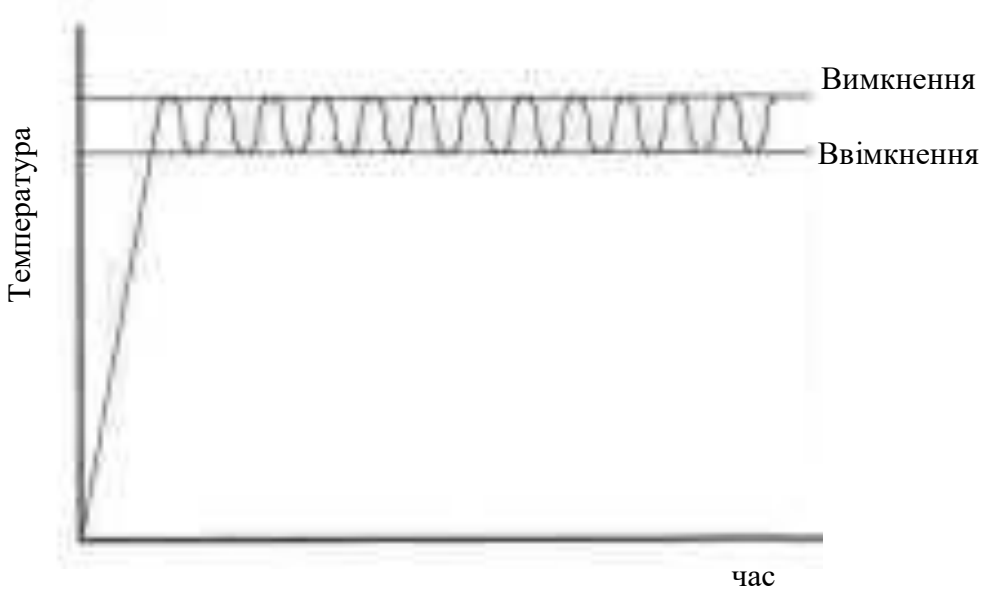


Рисунок 3.2 – Крива зміни температури при двопозиційному регулюванні типу "Ввімкнено-вимкнено" без часової затримки

Ситуація на нижній межі аналогічна. Коли температура, зафіксована датчиком, досягне нижньої межі, нагрівач знову увімкнеться, але для цього знадобиться певний час, поки датчики зафіксують зміну. У цей період температура може продовжувати знижуватися нижче встановленої межі ввімкнення нагрівача, підключеного до зони. Важливо відзначити, що ефективність двопозиційного регулювання в значній мірі не залежить від якості самого регулятора, а в основному визначається характеристиками навантаження, зокрема часовою затримкою між нагрівачем і датчиком.

3.4.2 Пропорційний регулятор

Замість того, щоб повністю вмикати або вимикати нагрівач, ми будемо поступово регулювати його потужність: від нульового значення до максимальної. Якщо різниця між межами вимкнення та повною потужністю нагріву становить чверть від загальної потужності, то нагрівач буде працювати на 25%. Якщо різниця дорівнює половині від загальної потужності, то нагрівач працюватиме на 50%, і так далі. Іншими словами, вихідний сигнал визначається як добуток

коефіцієнта пропорційності та помилки, тобто різниці між фактичним і заданим значенням температури.

Для пропорційного регулятора можливе стійке рівноважне стан, у якому кількість поданого тепла точно відповідає потребі, і температура залишатиметься сталою. Як показано на рис. 3.3, потужність нагрівача буде постійною і складатиме 50% від його максимальної потужності. Однак це надто ідеалізована ситуація, яка ґрунтується на припущенні, що потреба в потужності регулятора є постійною. Якщо це було б так, то регулятор взагалі не був би потрібен, достатньо було б просто трансформатора з різними виходами або автотрансформатора. Насправді ж, кількість тепла, яке необхідно подавати від нагрівача для регулювання температури ґрунту газону, змінюється в досить широких межах. Тому фактичний графік температури буде більше нагадувати той, що зображений на рис. 3.4.

Пропорційний регулятор, як і двопозиційний, дуже чутливий до часових затримок. На практиці, для забезпечення стабільності, ширина смуги пропорційності цього регулятора повинна відповідати ширині смуги коливань температури при двопозиційному регулюванні. Під час тривалої роботи якість регулювання пропорційного регулятора для підтримки стабільного стану не є кращою за двопозиційне регулювання. Відмінність лише в тому, що усуваються пульсації — коливання з малим періодом.

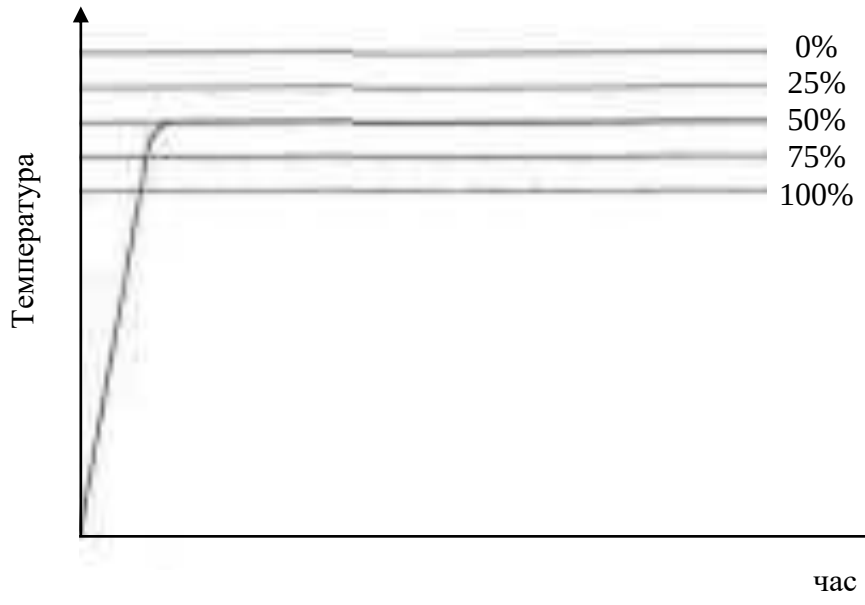


Рисунок 3.3 – Стан стійкої рівноваги для пропорційного регулятора

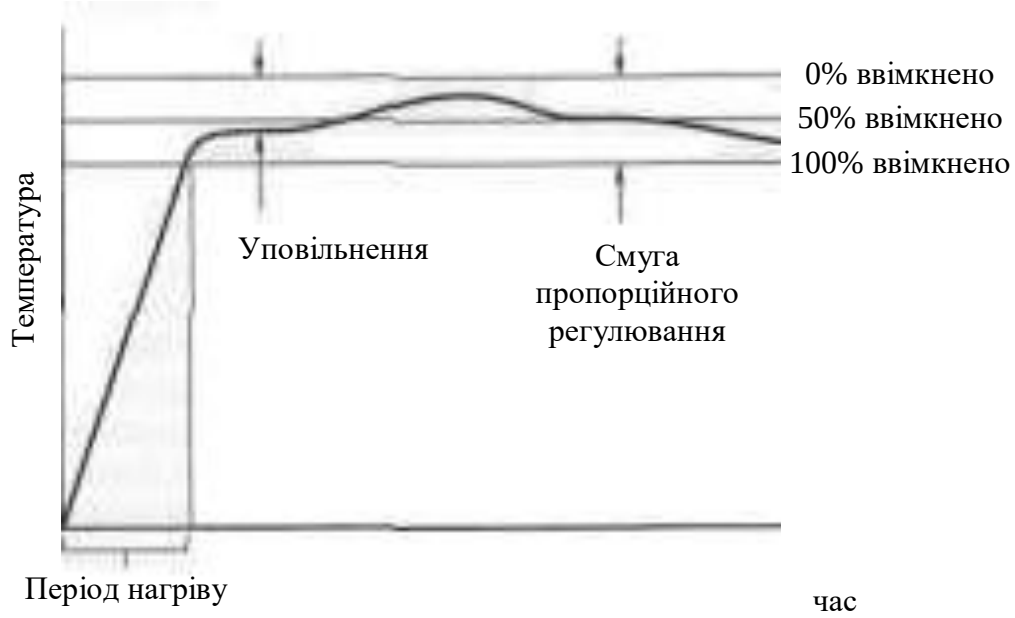


Рисунок 3.4 – Фактичний графік температури для пропорційного регулятора

Отже, жоден з двох типів простих регуляторів температури не може забезпечити високу якість роботи за наявності значних часових затримок, що характерні для обладнання, яке використовується при регулюванні температури ґрунтового шару газону футбольного поля.

3.4.3 Пропорційно-інтегральний регулятор

Для досягнення високих показників роботи за умов значних часових затримок слід розглянути так званий пропорційний регулятор з автоматичним поверненням у початкове положення або пропорційно-інтегральний регулятор.

Зв'язок між вихідним сигналом регулятора $X_{вих}$ і різницею між фактичним і заданим значеннями температури ε описується рівнянням:

$$X_{вих} = K_1\varepsilon + K_2\int \varepsilon dt \qquad (3.1)$$

Для правильно налаштованого ПІ-регулятора фактичне стійке значення температури завжди буде відповідати заданому. Якісно налаштований регулятор надійно підтримуватиме температуру ґрунтового шару газону з точністю до 1° в межах усього діапазону змін — від повного нагріву до повного охолодження, незважаючи на часові затримки між нагрівачем і датчиком.

3.4.4 Пропорціонально-інтегрально-диференціальний регулятор

У практичних регуляторах до інтегральної складової часто додається диференціальна складова, яка не змінює стійкий стан регульованої величини. Ця складова виступає як попереджувальна, дозволяючи регулятору швидше реагувати на зміни (рис. 3.5). Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (ПІД-регулятор), незалежно від того, чи є він окремим пристроєм чи частиною мікропроцесорної панелі, є найбільш ефективним рішенням для всіх типів обладнання, що регулює температуру ґрунтового шару газону, а також для задач з великими часовими затримками.

Отже, фактичний вихідний сигнал ПІД-регулятора можна виразити за допомогою такої формули:

$$X_{вих} = K_1\varepsilon + K_2\int \varepsilon dt + K_3\frac{d\varepsilon}{dt} \qquad (3.2)$$

ПІД-регулятор здатний ефективно обробляти великі часові затримки та підтримувати задану температуру. Однак для цього необхідно правильно його налаштувати. Для забезпечення оптимальної роботи регулятора смугу пропорційного регулювання, час відновлення до початкового стану та швидкість регулювання слід налаштувати відповідно до конкретного

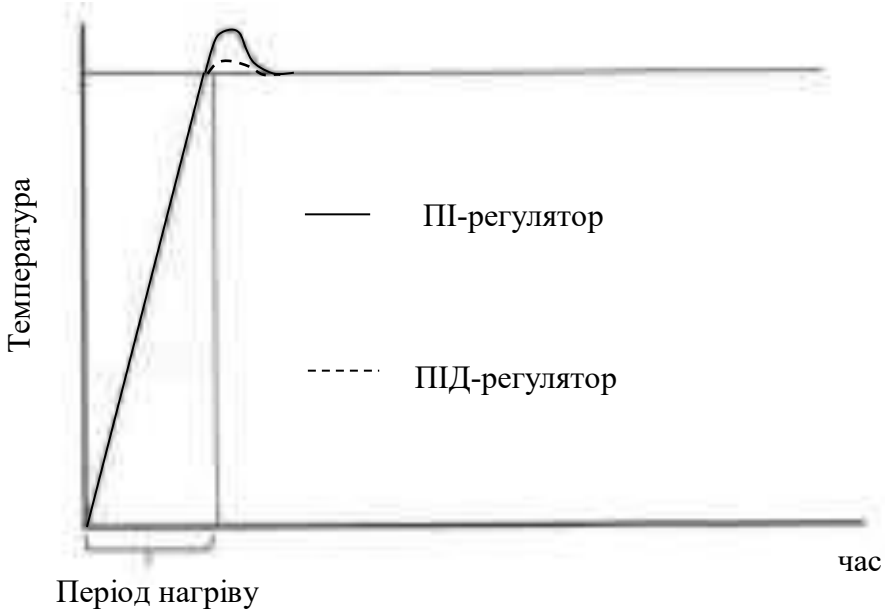


Рисунок 3.5 – Температурні криві для системи нагріву екструдера, що керується ПІ- та ПІД-регулятором

навантаження. Наприклад, якщо час автоматичного скидання (інтегральна складова) буде занадто довгим, робота регулятора сповільниться, а якщо цей час буде занадто коротким, це призведе до сильних коливань температури.

Налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора не є складним, але потребує розуміння принципів його роботи. Для недосвідченого оператора цей процес може бути досить важким, а навіть досвідченому спеціалісту він може зайняти значний час.

Оптимальне рішення для такої задачі пропонують сучасні мікропроцесорні регулятори [15]. Вбудоване програмне забезпечення аналізує термічний контур навантаження і автоматично налаштовує коефіцієнти на оптимальні значення, звільняючи оператора від тривалої налаштування. Новітні системи також дозволяють оператору здійснювати налаштування системи відповідно до його конкретних вимог, щоб забезпечити бажану реакцію. Деякі оператори віддають перевагу повільному наближенню до заданого значення без перерегулювання, в той час як інші хочуть, щоб система реагувала швидше і досягала заданої температури якнайшвидше. Після того, як оптимальні налаштування знайдені, зміни в них зазвичай вносяться рідко.

3.4.5 Нечітка логіка

Нечітка логіка є потужним методом, який використовують для систем з багатьма змінними, особливо коли взаємозв'язок між причиною та наслідком точно невідомий. Однак малоймовірно, що системи на основі нечіткої логіки можуть перевершити ПІД-регулятори в простих контурних системах регулювання температури. Якщо одна система має перевагу перед іншою, це не через різницю в їхній функціональності — обидві виконують однакові завдання, а через те, як саме вони їх виконують. В конкретній ситуації одна система може працювати швидше за іншу, але лише в цьому аспекті. З огляду на це, можна розробити функціональну схему системи регулювання мікроклімату ґрунтового шару за температурним каналом (див. слайд 04.01).

3.5 Розробка схем електричних принципових реалізації системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури

Для побудови мікропроцесорної системи автоматичного регулювання (САР) відповідає однокристальний мікроконтролер типу AT90S4433, який має вбудовані цифрові аналогові перетворювачі (ЦАП і АЦП). У схемі регулювання мікроклімату ґрунтового шару по температурному каналу можна виділити дві основні частини: слабкострумову (керуючу) і силову (енергетичну). Реалізація слабкострумової частини на одному мікропроцесорі підвищує надійність і універсальність системи, спрощуючи впровадження необхідних алгоритмів зміни керуючих сигналів. Оскільки інформація про процес регулювання представлена в цифровому вигляді та не залежить від енергетичної складової сигналу, вона менш схильна до впливу перешкод і спотворень.

Слабкострумова частина мікропроцесорної САК має виконувати функції програмного управління цифровим регулятором і формування спеціальних кодових послідовностей для керування силовою частиною, зокрема для передачі сигналу на двигун заслінки. Принципова схема системи регулювання мікроклімату ґрунтового шару за температурним каналом представлена на слайді 08.00. Вона включає мікроконтролер AT90S4433, що реалізує алгоритм керування, вхідний роз'єм для прийому сигналів від датчика вологості та задаючого пристрою, вхідні масштабуючі підсилювачі, які адаптують вхідні сигнали до рівня, сумісного з мікроконтролером, а також вихідний роз'єм, через який сигнали надходять на пристрій керування нагрівальним елементом та рідкокристалічний індикатор.

На елементі DD3 (мікросхема AT90S4433) зібраний мікроконтролер з вбудованим тактовим генератором G1, частота якого визначається зовнішнім кварцовим резонатором на 12 МГц. Вхідні масштабуючі підсилювачі, що перетворюють вхідні сигнали датчиків і задаючого пристрою до рівня, сприйманого мікропроцесорною системою, виконані на елементах DA3 і DA4 (мікросхеми К140УД17). Ці операційні підсилювачі використовуються для підсилення сигналів без викривлень, зокрема, вони подавляють синфазний сигнал,

мають малу напругу зміщення нуля, низький дрейф та рівень шумів, а також високий вхідний опір. Зміна масштабу сигналу до потрібного рівня здійснюється шляхом регулювання коефіцієнта підсилення операційних підсилювачів [16-18].

Далі, сигнали з підсилювачів через мультиплексор DD1 (мікросхема AD7890) подаються на входи мікроконтролера. Керуючі сигнали з портів PB1 та PB2 мікроконтролера надходять на демультиплексор DD2 (мікросхема К530 ИД7), з якого через відповідний роз'єм передаються на керування нагрівальним елементом. Використання мультиплексора та демультиплексора в схемі є стратегічним рішенням для розширення функціональних можливостей мікроконтролера. Це дозволяє, в разі потреби, додавати нові функції або пристрої без суттєвих змін в апаратній частині, оскільки технічні характеристики мікроконтролера AT90S4433 підтримують таке розширення.

На представленому кресленні також зображена електрична принципова схема стабілізатора блоку живлення для розроблюваної системи. Стабілізатор забезпечує стабільне напругове живлення для мікроконтролера та інших елементів системи, що гарантує їх надійну роботу при змінних умовах живлення. Роз'єм XP3, розташований на платі, забезпечує зручний доступ для програмування та перепрограмування мікроконтролера через SPI INTERFACE. Це дозволяє оператору здійснювати оновлення програмного забезпечення або вносити зміни у функціональність мікроконтролера без необхідності фізично замінювати компоненти системи. Така можливість розширення функцій або коригування алгоритмів роботи системи є важливим елементом, що підвищує гнучкість і масштабованість розроблюваної системи, а також забезпечує її подальший розвиток в разі змін у вимогах або функціональних можливостях.

4 РОЗРАХУНКИ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ, ЩО ПІДТВЕРДЖУЮТЬ ПРАЦЕЗДАТНІСТЬ ВИРОБУ

4.1 Рівняння елементів системи:

об’єкта:

$$T_0(\frac{d\Theta}{dt}) + \Theta = k_0\mu - k_1 f \ ; \tag{4.1}$$

вимірювальної схеми:

$$U_м = k_2 \Delta X \ ; \tag{4.2}$$

підсилювача:

$$U_y = k_3 U_м \ ; \tag{4.3}$$

виконавчого двигуна (з редуктором і клапаном)

$$T_1(\frac{d^2\mu}{dt^2}) + \frac{d\mu}{dt} = k_4 U_y \ . \tag{4.4}$$

Параметри:

X – поточне значення температури після датчика; Θ – температура теплоносія в об’єкті; X_0 – задане значення температури теплоносія; $\Delta X = X_0 - X$ – відхилення температури; μ – переміщення клапана; $U_у$ – напруга управління двигуном; f – еквівалентне збурююче діяння; $U_м$ – вихідна напруга вимірювального мосту; U_0 – напруга живлення мостової схеми.

Для розрахунків приймемо наступні значення коефіцієнтів підсилення та сталих часу:

T_0 = 2,0 с; T_1 = 0,050 с; k_0 = 5,0 град/см; k_1 = 1,2 град/см;

k_2 = 0,8 В/град; k_3 = 20; k_4 = 0,10 см/В·с; f = 0,5 см

Система повинна задовольняти наступним вимогам:

- максимальне перерегулювання не повинно перевищувати 25 %;

- час регулювання приймається зменшеним на 30 % від отриманого для заданих параметрів системи;

- запас стійкості за модулем не менше 15 дБ, за фазою не менше 30°;

- в процесі синтезу САР розробити систему, оптимальну за швидкодією.

4.2 Будова, принцип регулювання та принцип дії САР

Завдання системи автоматичного регулювання (САР) полягає у підтримці стабільної температури теплоносія на заданому рівні, який встановлює оператор, шляхом коригування подачі палива до котла. Контроль температури здійснюється за допомогою термодатчика. САР включає об’єкт регулювання, термодатчик, вимірювальну мостову схему, задавач, фазочутливий підсилювач, виконавчий двигун з редуктором та клапан.

У стаціонарному режимі, коли температура теплоносія досягає заданого значення, міст знаходиться в балансі. Різниця напруги на виході вимірювальної діагоналі стає нульовою, і напруга на виході підсилювача також дорівнює нулю. У результаті виконавчий двигун не змінює положення клапана, що регулює подачу палива в котел, забезпечуючи стабільний рівень температури теплоносія. Система працює в режимі автоматичного регулювання, підтримуючи задану температуру без необхідності втручання оператора.

Якщо температура теплоносія зміниться у будь-якому напрямку, міст вийде з балансу, і на його виході виникне напруга розбалансу з відповідною фазою. Ця напруга підсилюється фазочутливим підсилювачем, який має необхідний коефіцієнт підсилення для управління виконавчим двигуном. Двигун, у свою чергу, змінить положення клапана регулювання подачі палива в котел, збільшуючи або зменшуючи подачу палива в залежності від знака напруги, що надходить на вхід підсилювача.

Отже, у цій схемі застосовано принцип регулювання за відхиленням фактичного значення вихідної величини від її заданого рівня. Для реалізації цього принципу САР повинна працювати в замкнутому циклі. Основною перевагою цієї схеми є те, що система автоматично коригує відхилення від заданого значення незалежно від причин, що викликали ці зміни.

4.3 Функціональна схема САР

Побудовано функціональну схему САР, яка представлена на рис. 4.1. (слайд 05.01).

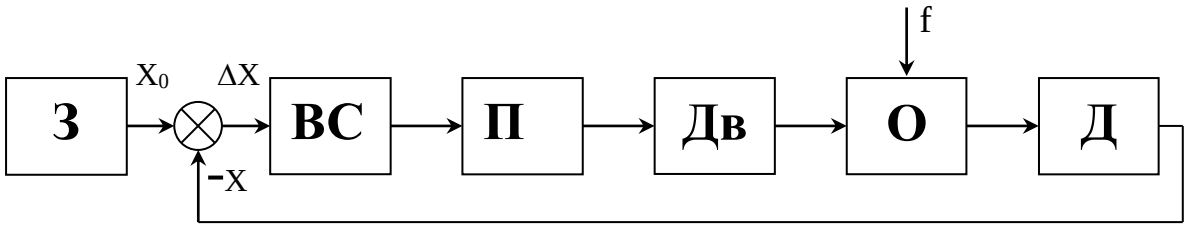


Рисунок 4.1 – Функціональна схема системи регулювання мікроклімату шару ґрунту по каналу температури:
З – задаючий пристрій; ВС – вимірювальна схема;
П – підсилювач; Д – двигун(з редуктором і клапаном);
О – об’єкт регулювання; Д – датчик

4.4. Структурна схема САР

При розробці структурної схеми САР були використані диференціальні рівняння елементів цієї системи. Тепер перейдемо від диференціальних рівнянь до передаточних функцій елементів. Передаточна функція елемента — це відношення Лапласового зображення вихідної величини до Лапласового зображення вхідної величини при нульових початкових умовах. Щоб отримати передаточну функцію об’єкта, ми прирівнюємо збурювальний вплив \(f \) до нуля, оскільки наша мета — визначити передаточну функцію по керуючому впливу. Таким чином, отримуємо диференціальне рівняння об’єкта в наступній формі:

$$T_0\left(\frac{d\Theta}{dt}\right) + \Theta = k_0\mu \qquad (4.5)$$

Для отримання передаточних функцій елементів схеми використано пряме перетворення Лапласа.

$T_0\overline{\Theta}p + \overline{\Theta} = k_0\overline{\mu}$, де p – оператор Лапласа.

$$W_o(p) = \frac{\overline{X}_{вих}}{\overline{X}_{вх}} = \frac{\overline{\Theta}}{\overline{\mu}} = \frac{k_0}{T_0 p + 1}. \qquad (4.6)$$

Це аперіодична динамічна ланка.

Аналогічно отримуємо передаточні функції інших елементів системи:

- вимірювальної схеми:

$$W_{вс}(p) = \frac{\overline{U}_м}{\Delta\overline{X}} = k_2 . \tag{4.7}$$

Це підсилювальна динамічна ланка;

- підсилювача:

$$W_п(p) = \frac{\overline{U}_у}{\overline{U}_м} = k_3 . \tag{4.8}$$

Це підсилювальна динамічна ланка;

- двигуна:

$$W_{Дв}(p) = \frac{\overline{\mu}}{\overline{U}_у} = \frac{k_4}{p(T_1 p + 1)} . \tag{9}$$

Це реальна інтегруюча ланка;

- датчика:

$$W_Д(p) = 1 . \tag{4.10}$$

Це повторювач.

Об'єднавши типові динамічні ланки відповідно до передачі впливу, отримуємо структурну схему системи автоматичного регулювання температури, зображену на рис. 4.2 (слайд 05.02).

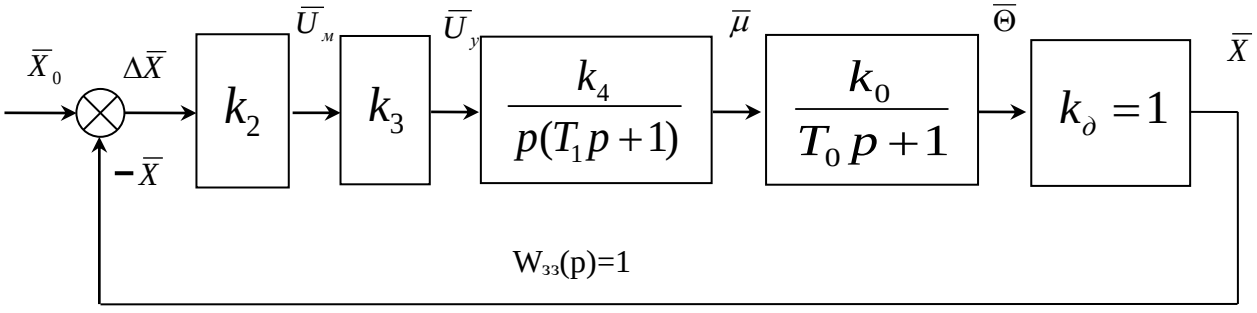


Рисунок 4.2 – Структура САР температури газону футбольного поля

4.5 Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння

Елементи структурної схеми САР з'єднані послідовно, тому для отримання передаточної функції розімкнутої системи необхідно перемножити передаточні функції всіх елементів.:

$$W_p(p) = W_{вс}(p) \cdot W_n(p) \cdot W_{Дв}(p) \cdot W_o(p) \cdot W_Д(p) = \frac{k_0 k_2 k_3 k_4}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}$$

Для спрощення запису введемо позначення:

$$k = k_0 k_2 k_3 k_4$$

Тоді передаточна функція розімкнутої системи матиме вигляд:

$$W_p(p) = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}. \quad (4.11)$$

Передаточна функція замкнутої системи, з врахуванням того, що $W_{зз}(p) = 1$, розраховується за формулою

$$W_з(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) + k}. \quad (4.12)$$

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k = 0, \quad (4.13)$$

$$0{,}1 p^3 + 2{,}05 p^2 + p + 8 = 0.$$

4.6 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи

4.6.1 Побудова АФЧХ розімкнутої системи

Для побудови амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнутої системи необхідно у відповідній передаточній функції провести заміну $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω – частота), виділити дійсну $P(\omega)$ і уявну $Q(\omega)$ частини та, змінюючи частоту від 0 до ∞, відкласти відповідні значення:

$$W_p(j\omega)=\frac{k}{j\omega(T_1 j\omega+1)(T_0 j\omega+1)}=\frac{k}{T_1T_0(j\omega)^3+(T_1+T_0)(j\omega)^2+j\omega}=$$

$$=\frac{k}{-jT_1T_0\omega^3-(T_1+T_0)\omega^2+j\omega}=\frac{k}{-(T_1+T_0)\omega^2+j(\omega-T_1T_0\omega^3)}=$$

$$=\frac{k(-(T_1+T_0)\omega^2-j(\omega-T_1T_0\omega^3))}{(-(T_1+T_0)\omega^2)^2+((\omega-T_1T_0\omega^3))^2}$$

Отже, підставивши значення коефіцієнтів і сталих часу, отримаємо:

$$P(\omega)=\frac{k(-(T_1+T_0)\omega^2)}{(-(T_1+T_0)\omega^2)^2+((\omega-T_1T_0\omega^3))^2}=\frac{8(-(0{,}05+2)\omega^2)}{(-(0{,}05+2)\omega^2)^2+((\omega-0{,}05\cdot2\cdot\omega^3))^2};$$

$$Q(\omega)=\frac{k(-(\omega-T_1T_0\omega^3))}{(-(T_1+T_0)\omega^2)^2+((\omega-T_1T_0\omega^3))^2}=\frac{8(-(\omega-0{,}05\cdot2\cdot\omega^3))}{(-(0{,}05+2)\omega^2)^2+((\omega-0{,}05\cdot2\cdot\omega^3))^2}$$

Побудуємо графік АФЧХ розімкнутої системи (рис. 4.3).

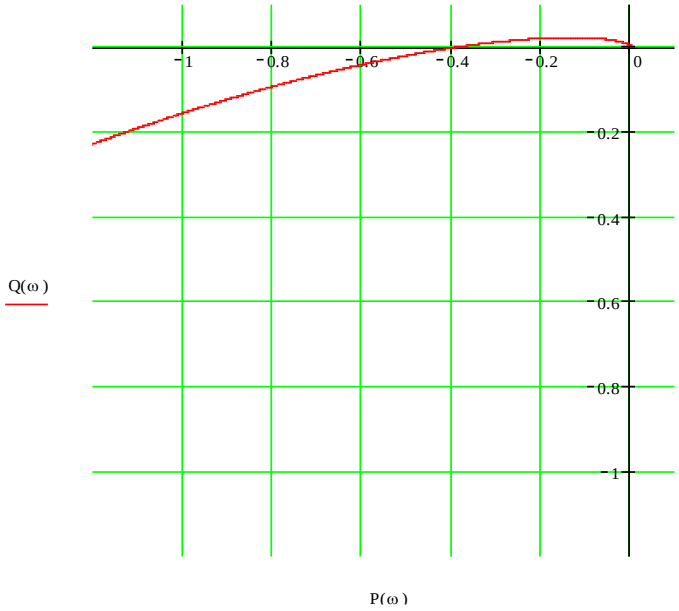


Рисунок 4.3 - АФЧХ розімкнутої системи

4.6.2 Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи

Для побудови ЛАЧХ за допомогою асимптотичного методу передусім потрібно знайти спрягаючі частоти за сталими часу динамічних ланок:

$\omega_0=\frac{1}{T_0}=\frac{1}{2}=0{,}5$ с$^{-1}$, належить аперіодичній ланці;

$\omega_1=\frac{1}{T_1}=\frac{1}{0{,}05}=20$ с$^{-1}$, належить аперіодичній ланці.

Знайдені спрягаючі частоти відмічаємо на осі частот в логарифмічному масштабі (рис. 4.4). Низькочастотна асимптота ЛАЧХ при $\omega < \omega_0$ являє собою пряму з нахилом –20 дБ/дек, так як система містить інтегруючу динамічну ланку. Ця пряма або її продовження при $\omega = 1$ повинна мати ординату, яка дорівнює 20lg k = 18,06 дБ (k = 8 – коефіцієнт підсилення розімкнутої системи).

Після кожної з спрягаючих частот характеристика змінюється на -20 дБ/декаду порівняно з попереднім значенням, оскільки ці частоти відповідають аперіодичним динамічним ланкам першого порядку. Високочастотна асимптота ЛАЧХ, тобто її частина для частот, більших за певне значення, має нахил -60 дБ/декаду.

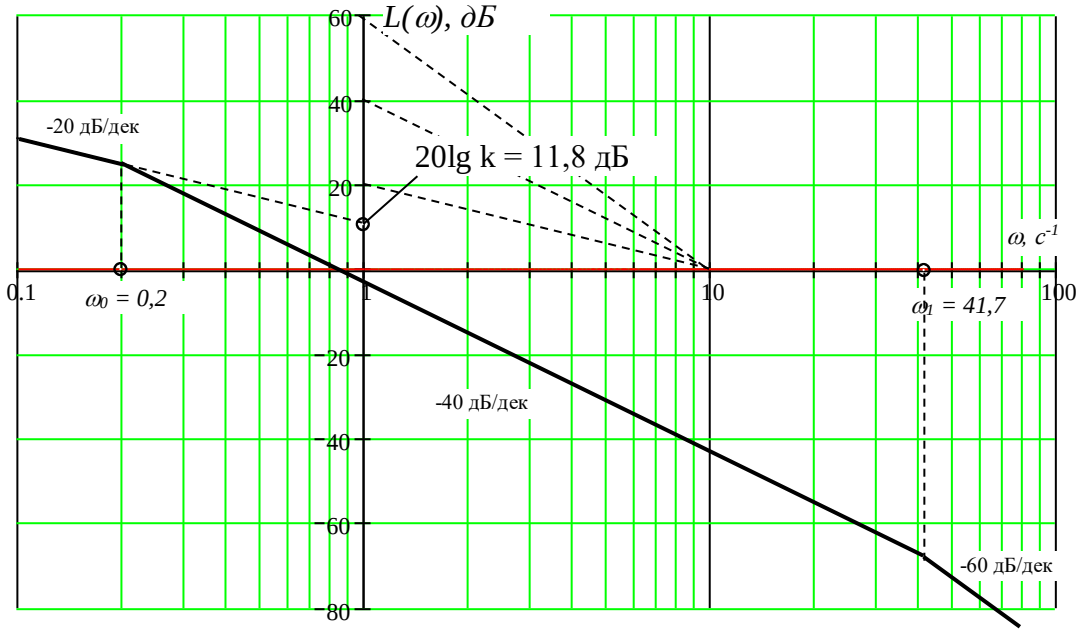


Рисунок 4.4 – ЛАЧХ розімкнутої системи $L(\omega)$

4.6.3 Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи

ЛФЧХ одноконтурної розімкнутої системи отримується в результаті простого складання ординат фазових характеристик типових ланок (рис. 4.5):

$$\phi(\omega) = \left(-arctg(\omega T_0) - \left(\frac{\pi}{2} + arctg(\omega T_1) \right) \right) \cdot \frac{180}{\pi}. \qquad (4.14)$$

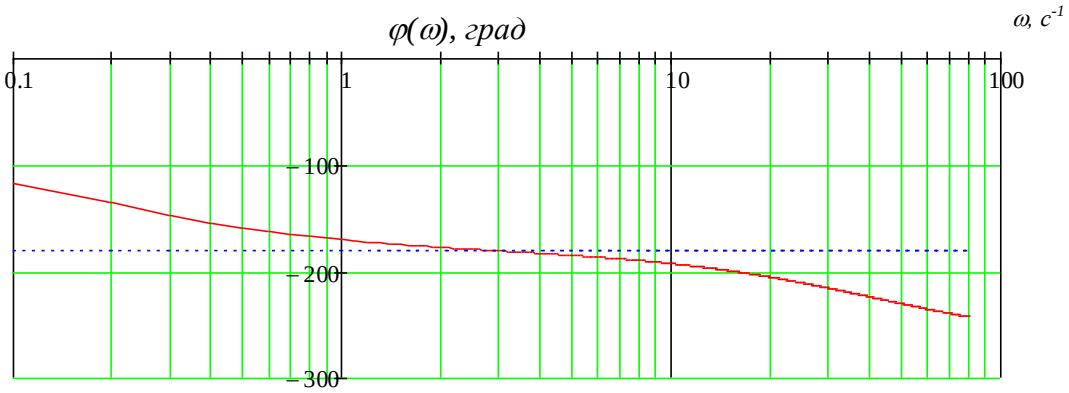


Рисунок 4.5 – ЛФЧХ розімкнутої системи $\varphi(\omega)$

4.7 Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи

Для цього необхідно виділити дійсну частину передаточної функції замкнутої системи, провівши заміну $p = j\omega$ ($j = \sqrt{-1}$, ω - частота), та, змінюючи частоту від 0 до ∞, відкласти відповідні значення $P_з(\omega)$:

$$W_з(\omega) = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) + k} = \frac{k}{T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0)p^2 + p + k};$$

Підставимо $p = j\omega$, отримаємо:

$$W_з(\omega) = \frac{k}{T_1 T_0 (j\omega)^3 + (T_1 + T_0)(j\omega)^2 + j\omega + k} = \frac{k}{- jT_1 T_0 \omega^3 - (T_1 + T_0)\omega^2 + j\omega + k} =$$

$$= \frac{k}{(k - (T_1 + T_0)\omega^2) + j(\omega - T_1 T_0 \omega^3)} = \frac{k((k - (T_1 + T_0)\omega^2) - j(\omega - T_1 T_0 \omega^3))}{(k - (T_1 + T_0)\omega^2)^2 + (\omega - T_1 T_0 \omega^3)^2}$$

Виділимо дійсну частину та побудуємо графік (рис. 4.6):

$$P_з(\omega) = \frac{k(k - (T_1 + T_0)\omega^2)}{(k - (T_1 + T_0)\omega^2)^2 + (\omega - T_1 T_0 \omega^3)^2} = \frac{8(8 - (0{,}05 + 2)\omega^2)}{(8 - (0{,}05 + 2)\omega^2)^2 + (\omega - 0{,}05 \cdot 2 \cdot \omega^3)^2}$$

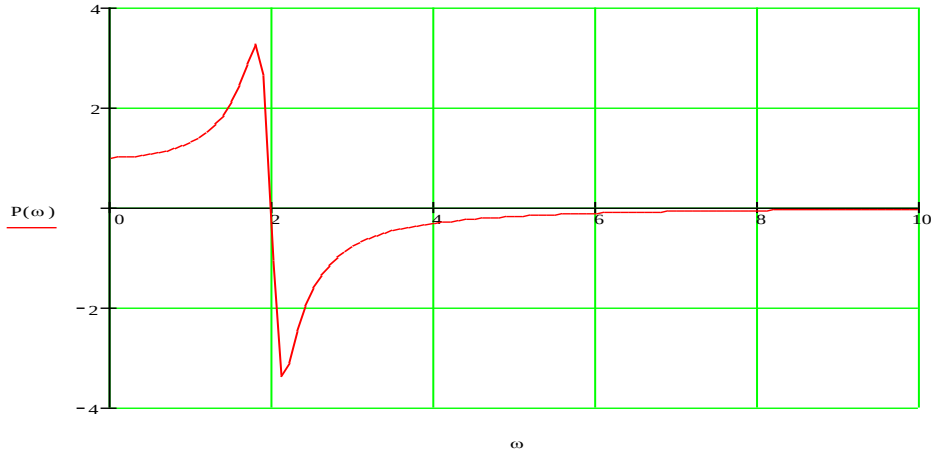


Рисунок 4.6 - Дійсна частотна характеристика замкнутої системи

4.8 Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості. Побудова області стійкості

4.8.1 Дослідження системи на стійкість та визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

Стійкість замкнутої системи автоматичного регулювання за цим критерієм визначається за амплітудно-фазовою частотною характеристикою стійкої розімкнутої системи (рис. 4.7, слайд 06.01). Розімкнута система автоматичного регулювання вважається стійкою, якщо вона складається лише з стійких динамічних ланок (тобто має не більше однієї інтегруючої ланки). Якщо розімкнута система є стійкою, то для забезпечення стійкості замкнутої системи достатньо, щоб її амплітудно-фазова характеристика не перетинала точку з координатами (-1, j0) при зміні частоти від 0 до ∞.

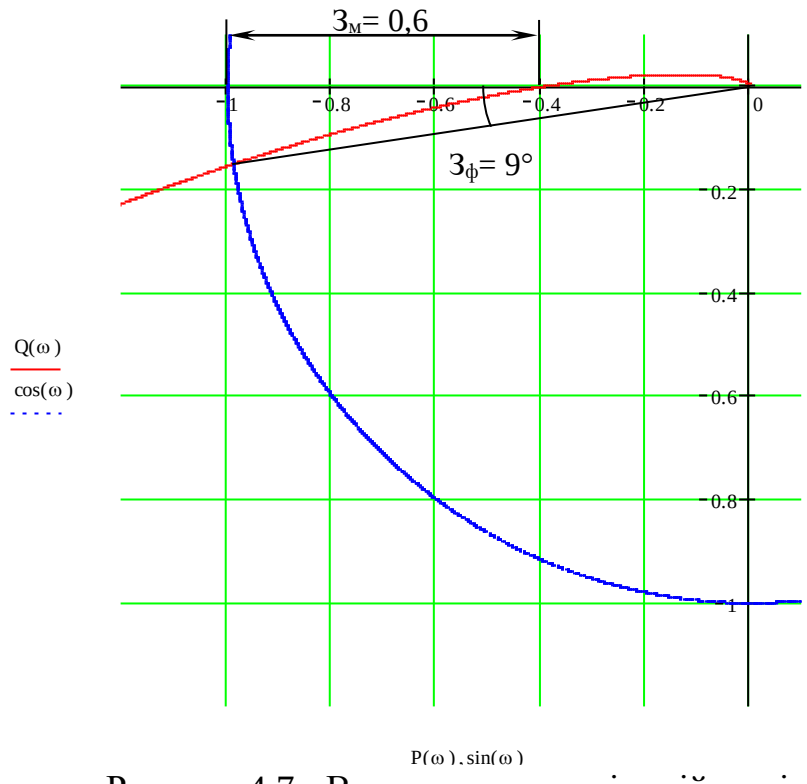


Рисунок 4.7 - Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

Таким чином маємо: за критерієм Найквіста-Михайлова система стійка і запас стійкості за модулем $З_м = 0,6$; за фазою – $З_ф = 9°$.

4.8.2 Дослідження системи на стійкість та визначення області стійкості за методом D-розбиття в площині одного параметра

Побудуємо область стійкості системи в площині параметру k_3, тому що його легко змінювати шляхом підбору коефіцієнту підсилення підсилювача:

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_1T_0p^3+(T_1+T_0)p^2+p+k_0k_2k_3k_4=0$$

Запишемо характеристичне рівняння відносно k_3:

$$K(p)=-\frac{\left(T_1T_0p^3+(T_1+T_0)p^2+p\right)}{k_0k_2k_4}$$

Підставивши $p=j\varpi$ та виділивши дійсну і уявну частини виразу, отримаємо:

$$K(\omega)=-\frac{\left(-jT_1T_0\omega^3-(T_1+T_0)\omega^2+j\omega\right)}{k_0k_2k_4}=\frac{(T_1+T_0)\omega^2}{k_0k_2k_4}+j\frac{\left(T_1T_0\omega^3-\omega\right)}{k_0k_2k_4}.$$

$$P(\omega)=\frac{(T_1+T_0)\omega^2}{k_0k_2k_4};\qquad Q(\omega)=\frac{\left(T_1T_0\omega^3-\omega\right)}{k_0k_2k_4}$$

Побудуємо криву D-розбиття в площині параметру k_3 при зміні частоти від - ∞ до + ∞ (рис. 4.8, слайд 06.02).

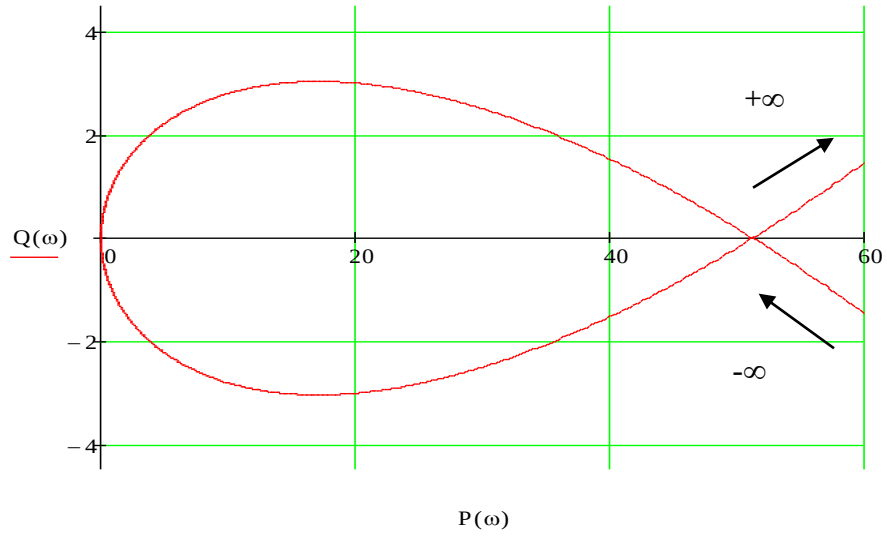


Рисунок 4.8 - D-розбиття в площині параметру

Оскільки в стійкій системі всі корені знаходяться ліворуч від уявної осі, при обході її від -∞ до +∞ ділянка стійкості також розташовується ліворуч від отриманої кривої. Для зручності визначення області стійкості на криву (рис. 9) можна нанести штриховку зліва, рухаючись від -∞ до +∞. За побудованою областю стійкості можна визначити критичне значення коефіцієнта k_3, яке в

даному випадку становить $k_{Зкр}$ = 51. Як видно, задане значення коефіцієнта підсилювача $k_З$ = 20 знаходиться в зоні стійкості.

4.9 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

Оцінка якості регулювання замкнутої САР полягає в визначенні запасу стійкості (по модулю і фазі) , та частоти зрізу. Для визначення цих величин будуємо ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкненої системи, при чому виконуємо їх взаємне розміщення (рис. 4.9, слайд 06.03).

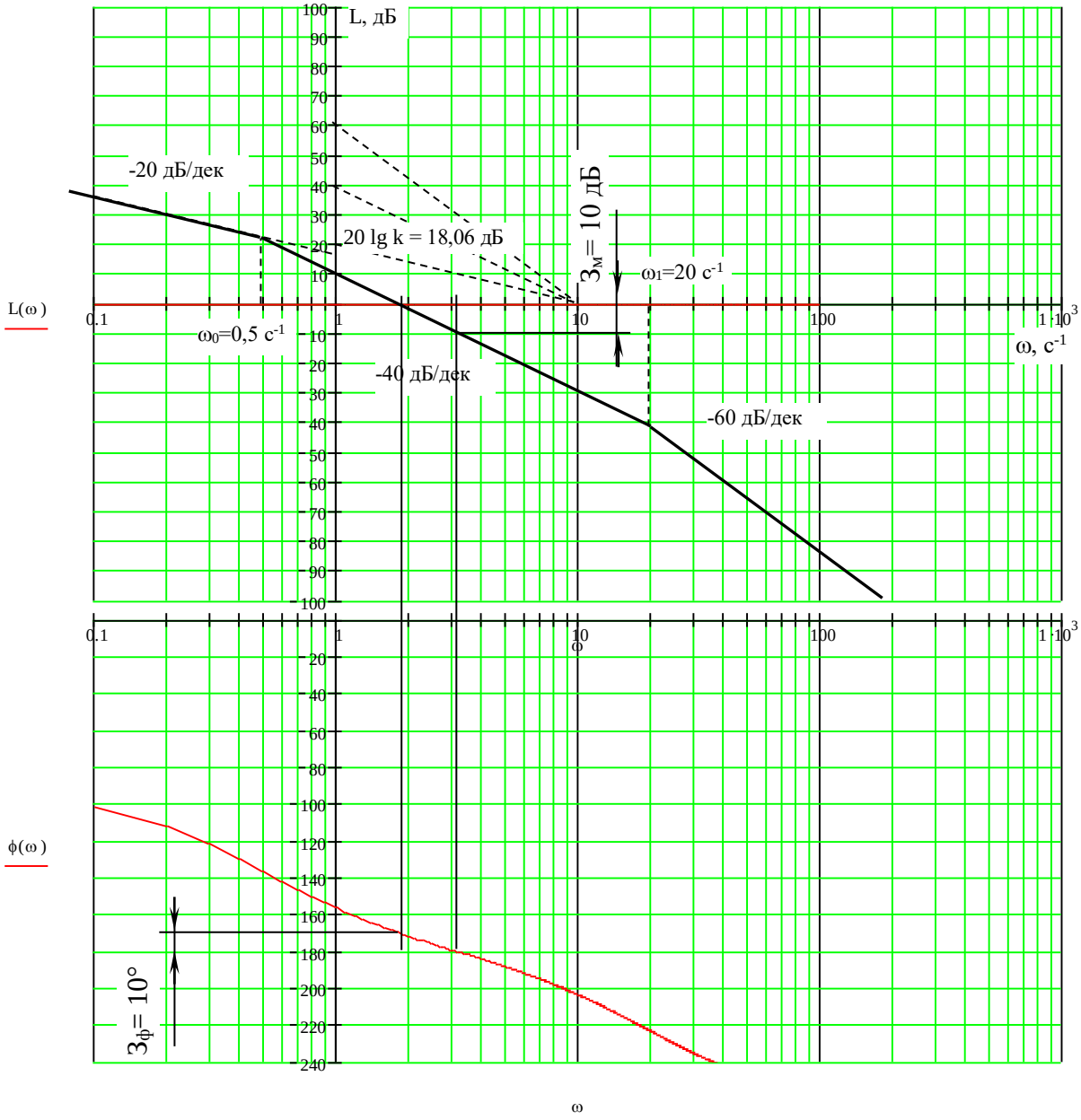


Рисунок 4.9 - Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

З даної побудови можна визначити: частота зрізу $\omega_з$ = 1,8 $с^{-1}$, звідки можна визначити час регулювання, поставивши систему в жорсткі умови, $t_p = \frac{2\pi}{\omega_з} = 3{,}49$ с; запас стійкості по амплітуді $з_м \approx 10$ дБ; запас стійкості по фазі $з_ф \approx 10°$.

4.10 Побудова перехідного процесу замкнутої системи

Регульована величина в часі при подачі на вхід системи одиничного ступінчастого діяння описується залежністю

$$h(t) = \frac{2}{\pi}\int_0^{\infty} Рз(\omega)\frac{\sin(\omega t)}{\omega}d\omega . \qquad (4.15)$$

Підставляючи відповідні значення, отримаємо наступний графік (рис. 4.10).

По графіку можна зробити висновок, що перехідний процес – коливальний, він здійснюється з незмінним періодом коливань.

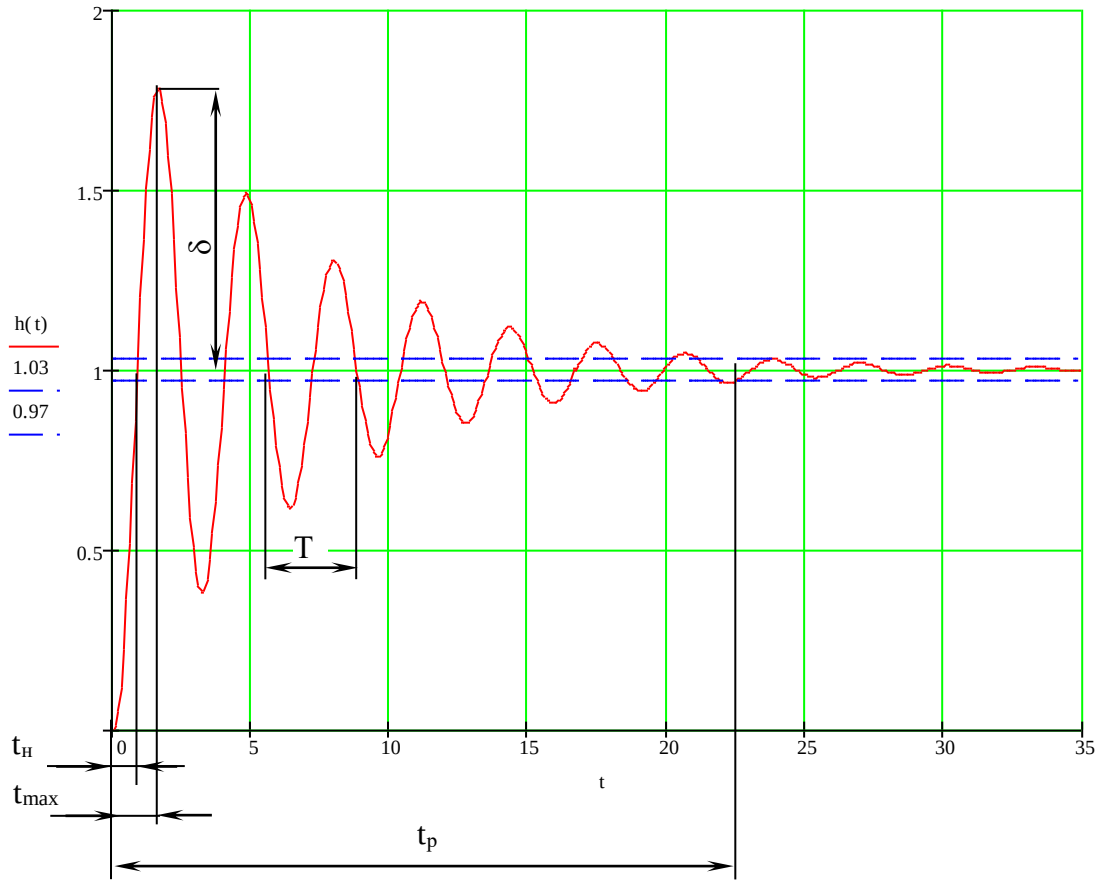


Рисунок 4.10 - Графік перехідного процесу вихідної системи

4.11 Визначення прямих показників якості САР

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

- час регулювання $t_р \approx 22,5$ с – це час від початку дії вхідного діяння до входження системи в зону 2Δ, він залежить від швидкодії динамічних ланок та від їх кількості в головному контурі; через те, що до системи ставляться жорсткі вимоги, то даний параметр, як вимога до САР для її аналізу та синтезу необхідно зменшити на 25 %, приймаємо $t_р = 15,75$ с;
- перерегулювання $\delta = 78$ %;
- частота коливань $\varpi = \frac{2\pi}{T} = 2,09\,с^{-1}$, де Т = 3 с – період коливань;
- кількість коливань перехідного процесу k = 6;
- час досягнення першого максимуму $t_{max1} = 1,7$ с;
- час наростання перехідного процесу $t_н = 1,01$ с – це час досягнення вихідною величиною усталеного значення;
- декремент затухання перехідного процесу характеризує затухання перехідного процесу, це відношення відхилень сусідніх коливань d = 1,625.

4.12 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї

Вимоги до синтезуємої САР: час регулювання $t_р = 15,75$ с; максимальне перерегулювання $\delta = 25\%$; запас стійкості за модулем не менше 15 дБ; за фазою не менше 30^o. Для синтезу САР необхідно побудувати вихідну ЛАЧХ розімкнутої системи, бажану ЛАЧХ та ЛАЧХ коректуючого пристрою.

Побудова бажаної ЛАЧХ виконується в кілька етапів (рис. 4.11, слайд 07.01).

Побудова в області низьких частот аналогічна до побудови ЛАЧХ незмінної системи. Тобто проводиться асимптота з нахилом -20 дБ/дек через точку з координатами 20 lg k = 18,06 дБ.

Побудова в області середніх частот – це найбільш відповідальна асимптота. В даному діапазоні ЛАЧХ визначається заданими значеннями перегулювання та тривалістю перехідного процесу. З міркувань наближення реального процесу до оптимального (за швидкодією) нахил середньо частотної асимптоти бажаної ЛАЧХ вибирається -20 дБ/дек. Вибір частоти зрізу $\omega_з$ (частота, при якій ЛАЧХ перетинає вісь частот) виконують на підставі нерівності $\omega_{з\min} \le \omega_з \le \omega_{з.опт}$. Для того, щоб задовольнити вимоги до якості системи, необхідно, щоб $\omega_з$ була менше частоти зрізу $\omega_{з.опт}$, яка визначається за максимальним прискоренням координати і величиною керуючого ступінчатого сигналу. Крім того дана частота $\omega_з$ повинна бути більше $\omega_{з\min}$, яка вибирається за заданим значенням максимального пере регулювання δ_m та тривалістю регулювання $t_р$. По заданому значенню δ_m за допомогою кривої $\delta = f(P_{з\max})$ номограми визначаємо відповідне значення $P_{з\max}$. Потім по значенню $P_{з\max}$ за допомогою кривої $t_p = f(P_{з\max})$ визначаємо значення $\frac{3\pi}{t_P}$. Цю величину прирівнюємо до заданого значення $t_р$ = 15,75 с і з отриманого рівняння визначаємо частоту зрізу $\omega_{з\min}$.= 0,59 $с^{-1}$.

Вибрану частоту зрізу $\omega_з$ = 0,6 $с^{-1}$ (дещо збільшену), наносимо на графік (рис. 4.11). Потім будуємо середньочастотну асимптоту, провівши її через точку $\omega_з$ на осі абсцис з нахилом –20 дБ/дек.

По відомому значенню $Р_{з\max}$ = 1,2 дійсної частотної характеристики знаходимо мінімальне значення $Р_{з\min}$, використовуючи наближене співвідношення для типової дійсної частотної характеристики $Р_{з\min}$ = 1 - $Р_{з\max}$ = - 0,2.

Для забезпечення необхідного запасу стійкості системи по амплітуді і фазі треба продовжити середньочастотну асимптоту ліворуч і праворуч на певну величину. Запаси стійкості знаходять по номограмам L(ω) = f(φ) при $Р_з$ дорівнює константі – це колові діаграми, $Р_з$ – значення дійсної частотної характеристики замкнутої системи. Отже по номограмі знаходимо лінії, які відповідають $Р_{з\max}$ = 1,2 і $Р_{з\min}$ = - 0,2. Ці криві симетричні відносно осі абсцис. Запас стійкості

по амплітуді знайдемо, провівши до цих кривих горизонтальні дотичні і прочитавши відповіді на осі ординат, L_1 = 15 дБ, L_2 = -15 дБ, тобто середньочастотну асимптоту треба продовжити ліворуч і праворуч до ординат L1 та L2 і лише після цього спрягати з сусідніми ділянками [22].

Запас стійкості по фазі γ знайдемо, провівши вертикальні дотичні до кривих P_{3max} = 1,2 і P_{3min} = - 0,2 і відрахувавши значення кута в градусах від дотичної до лінії -180°. В даному випадку γ = 45° [22], [23].

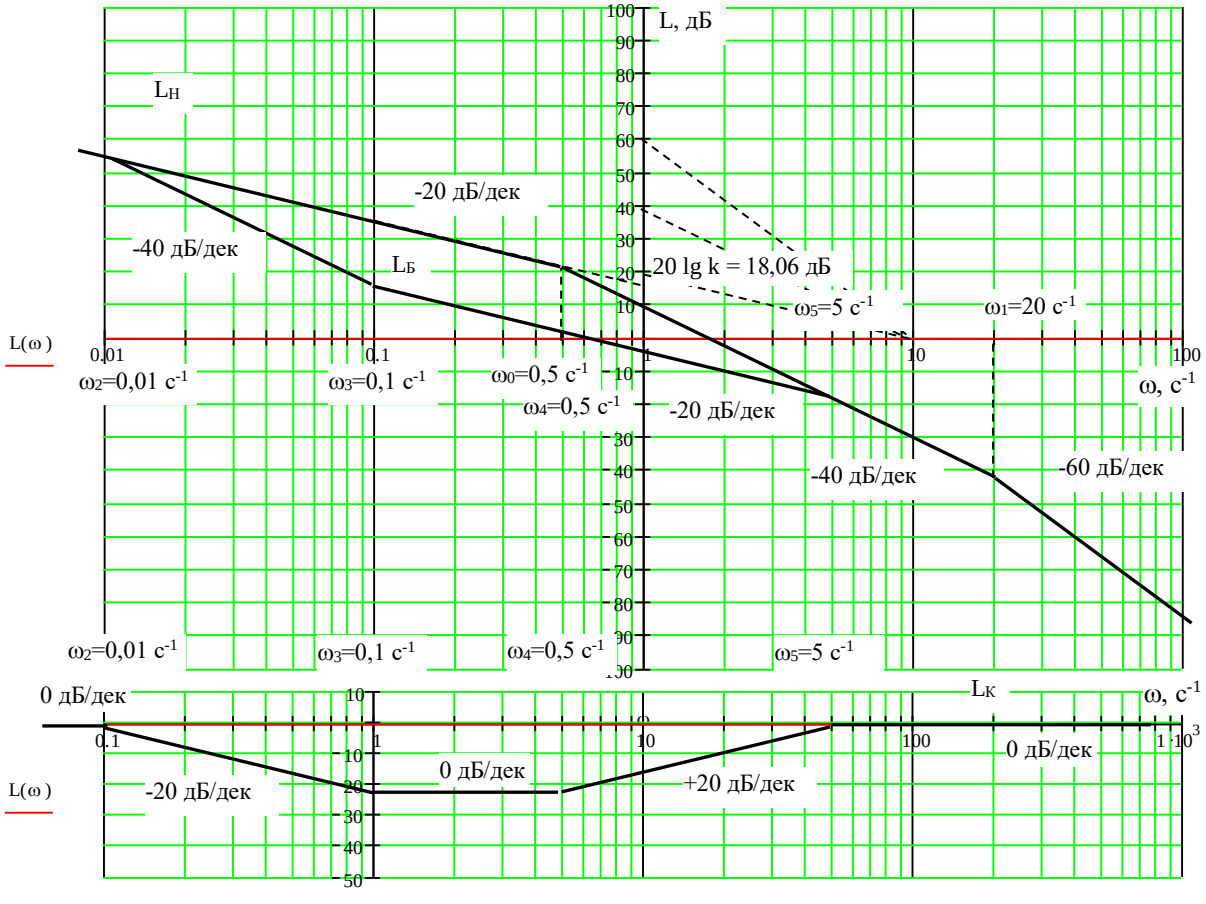


Рисунок 4.11 - Побудова бажаної ЛАЧХ та визначення ЛАЧХ корегуючого пристрою

4.13 Синтез коректуючого пристрою САР за логарифмічними частотними характеристиками

ЛАЧХ коректуючого пристрою визначаємо як різницю бажаної та незмінної ЛАЧХ $L_к = L_б(\omega).- L_н(\omega)$ (рис. 4.12). За виглядом ЛАЧХ коректуючого пристрою обираємо схему коректуючого пристрою [1]:

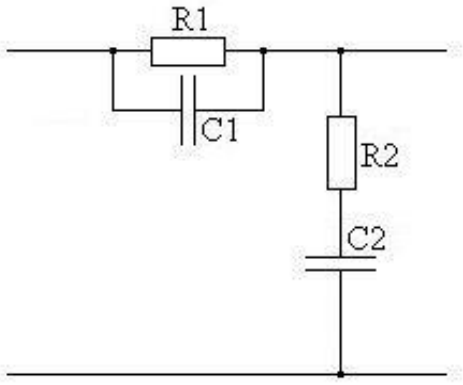


Рисунок 4.12 - Схема коректую чого пристрою

Передаточна функція такого чотириполюсника у загальному вигляді:

$$W_{кп}(p) = \frac{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}{(T_2 p + 1)(T_5 p + 1)} = \frac{(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}{a_0 p^2 + a_1 p + 1}$$

де $a_0 = R_1R_2C_1C_2$; $a_1 = R_1C_1 + R_2C_2 + R_1C_2$; $T_3 = R_1C_1$; $T_4 = R_2C_2$

Підставивши у рівняння загального виду сталі часу

$\omega_2 = 0{,}01\ с^{-1} \Rightarrow T_2 = 1/\omega_2 = 100$ с;

$\omega_3 = 0{,}1\ с^{-1} \Rightarrow T_3 = 1/\omega_3 = 10$ с;

$\omega_4 = 0{,}5\ с^{-1} \Rightarrow T_4 = 1/\ \omega_4 = 2$ с;

$\omega_5 = 5\ с^{-1} \quad \Rightarrow T_5 = 1/\ \omega_5 = 0{,}2$ с.

Отже, передаточна функція коректуючого пристрою:

$$W_{кп}(p) = \frac{(10p + 1)(2p + 1)}{(100p + 1)(0{,}2p + 1)}$$

Для отримання номіналів елементів коректуючого пристрою задавшись $C_1 = C_2 = 1000 \times 10^{-6} = 1000$ мкФ, отримано такі значення опорів:

R1 = 100 кОм; $R_2 = 20$ кОм.

4.14 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР

Запишемо передаточну функцію замкнутої скорегованої системи

$$W_{зк}(p) = \frac{k(T_3 p + 1)(T_4 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) \cdot (T_2 p + 1)(T_5 p + 1) + k \cdot (T_3 p + 1)(T_4 p + 1)} \qquad (4.16)$$

Провівши заміну p = jω, виділимо дійсну частину передаточної функції замкнутої скорегованої системи для побудови дійсної частотної характеристики (рис. 4.13):

$$P_з(\omega) = \frac{\left(k - k\left(T_3 T_4 \omega^2\right)\right)\left(\left(T_0 T_1^{\,2} + T_0 T_1 T_5 + T_1 T_5 (T_0 + T_1)\right)\omega^4 - \left((T_0 + T_1) + T_1 + T_5 + k T_3 T_4\right)\omega^2 + k\right) +}{\left(\left(T_0 T_1^{\,2} + T_0 T_1 T_5 + T_1 T_5 (T_0 + T_1)\right)\omega^4 - \left((T_0 + T_1) + T_1 + T_5 + k T_3 T_4\right)\omega^2 + k\right)^2 +}$$

$$\frac{+\left(k(T_3 + T_4)\right)\left(\left(T_0 T_1^{\,2} T_5\right)\omega^5 - \left(T_0 T_1 + (T_0 + T_1) T_1 + (T_0 + T_1) T_5\right)\omega^3 + \left(1 + k(T_3 + T_4)\right)\omega\right)}{+\left(\left(T_0 T_1^{\,2} T_5\right)\omega^5 - \left(T_0 T_1 + (T_0 + T_1) T_1 + (T_0 + T_1) T_5\right)\omega^3 + \left(1 + k(T_3 + T_4)\right)\omega\right)^2}$$

Побудуємо криву перехідного процесу синтезованої САР підігріву газону футбольного поля (рис. 4.14).

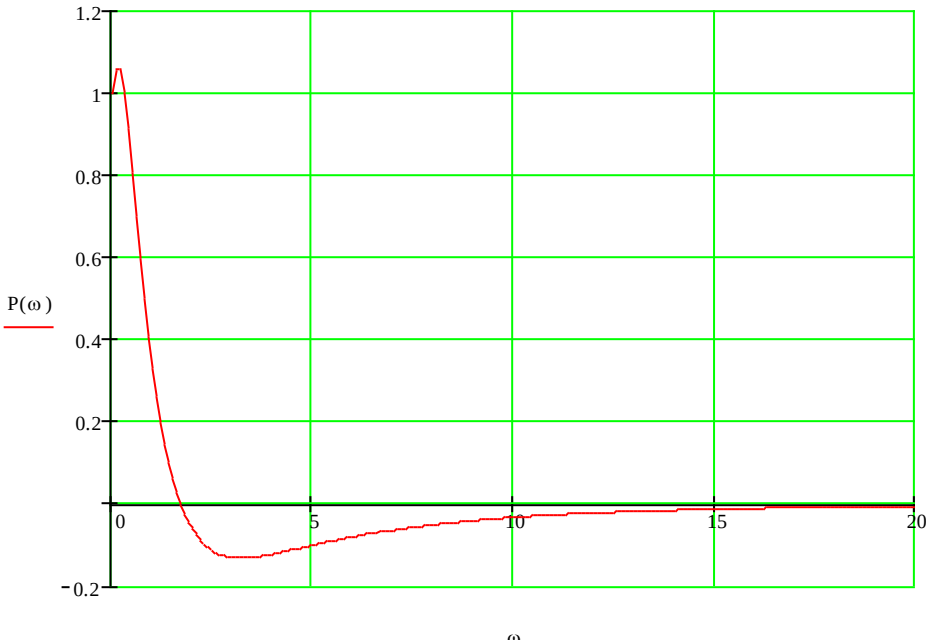


Рисунок 4.13 - Дійсна частотна характеристика замкнутої скорегованої системи

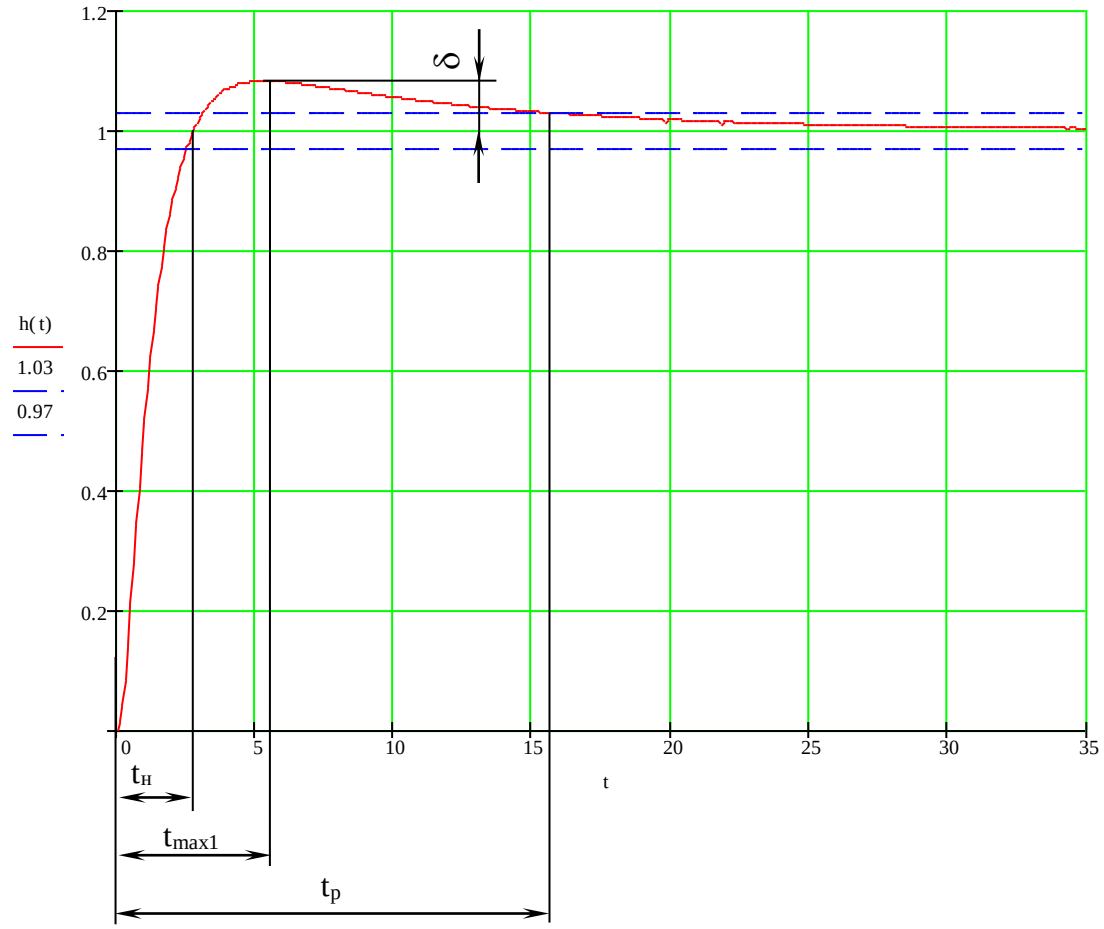


Рисунок 4.14 - Графік перехідного процесу системи, розробленої шляхом синтезу

4.15 Визначення прямих показників якості синтезованої САР

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

- час регулювання $t_р$ = 15,25 с;
- перерегулювання $\delta \approx 8{,}2$ %
- час досягнення першого максимуму t_{max} = 5,6 с
- час наростання перехідного процесу $t_н$ = 2,8 с
- по вигляду кривої цей перехідний процес аперіодичний з перерегулюванням.

Порівняння прямих показників якості вихідної та зкорегованої системи приведено на слайді 07.02. Отже, реалізація отриманого виразу передаточної функції коректуючого пристрою задовольнить задані вимоги по якості системи.

5 ОПИС ОРГАНІЗАЦІЇ РОБІТ, ЩО ПОВ'ЯЗАНІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ ШАРУ ҐРУНТУ ПО КАНАЛУ ТЕМПЕРАТУРИ

Високі вимоги до якості монтажних робіт, обмежені терміни їх виконання та постійно зростаючий обсяг робіт призвели до потреби в пошуку нових підходів до організації праці та вдосконалення технологічних методів. Це включає використання уніфікованих конструкцій, а також впровадження нових, більш економічних матеріалів. Монтаж засобів контролю та автоматизації на підприємствах проводиться на основі технічної документації, розробленої проектними організаціями, і здійснюється відповідно до вимог СНіП (Строительных норм и правил). Склад та зміст цієї документації визначаються відповідними стандартами і вказівками щодо проектування автоматизації виробничих процесів, що дозволяє забезпечити високий рівень якості та безпеки при виконанні монтажних робіт.

Монтажні креслення є основним документом для здійснення монтажних робіт, які виконуються відповідно до схем автоматизації конкретної виробничої ділянки, принципових схем живлення та сигналізації, схем зовнішніх електричних і трубопровідних підключень, а також загальних виглядів щитів і пультів управління.

5.1 Загальні вимоги при монтажі

Засоби автоматизації монтуються згідно з проектною документацією. Розташування і місця установки цих засобів повинні забезпечувати високу точність вимірювань, зручний доступ до них та до їхніх запірних і налагоджувальних елементів, гарну освітленість шкал і діаграм, а також зручність для обслуговування.

Перед початком монтажу засобів автоматизації в виробничих і щитових приміщеннях повинні бути завершені всі будівельні та оздоблювальні роботи,

монтаж та ізоляція технологічного обладнання, а також монтаж трубопроводів, електричних проводок, щитів і пультів. Прилади, які потребують теплоізоляції, монтуються разом з технологічними трубопроводами та обладнанням, а також прилади, що інтегруються в технологічні трубопроводи та апарати. Встановлення цих приладів здійснюється після очищення та продувки трубопроводів, перед їх обпресуванням.

Засоби автоматизації, що мають обертові та рухомі частини, встановлюються за рівнем або схилом, якщо їх конструкція не передбачає інший спосіб монтажу. Кріплення цих засобів на трубопроводах і технологічному обладнанні повинно забезпечувати герметичність з'єднань трубопроводів та апаратів. Технологічні трубопроводи, на яких встановлюються звужуючі пристрої, регулюючі клапани, об'ємні та швидкісні лічильники та інші прилади, повинні мати опори поблизу цих елементів. Прокладки і набивання, використовувані при монтажі засобів автоматизації, повинні відповідати вимогам умов їх експлуатації [24].

5.2 Монтаж кабельних ліній

Електричні проводки прокладаються по найкоротших маршрутах між приладами та агрегатами, що з'єднуються, у місцях, зручних для монтажу, обслуговування та ремонту, з мінімальною кількістю поворотів. Вони повинні проходити в зонах з відносно стабільною температурою, подалі від ділянок, де можливі механічні пошкодження, вібрації або струси кабелів та захисних пристроїв. Захист проводок, як у відкритих, так і в прихованих установках, має бути виконаний з негорючих, вологостійких та механічно стійких матеріалів.

Залежно від перетину жил проводів і кабелів, для приєднання провідників до приладів, апаратів, затискачів, а також для з'єднання провідників між собою встановлюються певні вимоги. Надійність електричних проводок та їх пожежна безпека значною мірою залежать від якості виконання цих з'єднань.

Проводки, що прокладаються в металевих трубах, незалежно від їх призначення, повинні мати відстань 25–30 мм від стін, перекриттів та інших будівельних елементів. Однак у виняткових випадках окремі мідні та сталеві труби (за винятком труб з нержавіючої сталі) можуть бути розташовані безпосередньо на сталевих, бетонних або цегляних поверхнях і кріпитися до них сталевими фіксуючими елементами.

Однодротові мідні жили проводів та кабелів з перетином 1 мм² підключають безпосередньо під гвинт або болт, тоді як багатодротові дроти такого ж перерізу слід приєднувати за допомогою наконечників або під гвинт чи болт. В залежності від конструкції виводів і затискачів приладів, апаратів і зборок, кінці однодротових і багатодротових проводів мають бути окінцьовані кільцем або штирем. Для багатодротових жил кільця або штирі потрібно пропаяти, а штирові кінці можна обпресувати штифтовими наконечниками.

Для зовнішньої проводки вибраний кабель типу КВВГ — контрольний кабель з мідними жилами, ізоляцією та оболонкою з полівінілхлоридного пластику. Кабель має 4 жили з перетином 0,75 мм². Вибір способу виконання електропроводки, марок кабелів та проводів, методів з'єднання жил, типів сполучних проводів тощо в проекті здійснено з економічних міркувань з урахуванням специфічних умов об'єкта автоматизації, таких як вибухонебезпека, пожежонебезпека та агресивність вихідних і одержуваних речовин.

Усі аналогові та дискретні сигнали подаються в крос-шафу, звідки вони розподіляються на контролер та пристрої для реєстрації і сигналізації. Вихідні сигнали з контролера також надходять до крос-шафи, з якої вони направляються на перетворювачі, а далі — на виконавчі пристрої.

5.3 Монтаж трубних ліній

Прокладка трубних проводок є однією з найскладніших і відповідальних операцій, від правильного виконання якої залежить ефективність і надійність роботи системи. Трубна проводка повинна бути безперервною та механічно

стійкою. Невідповідна щільність проводки може призвести до зниження точності показників приладів через спотворення імпульсу тиску. Трубні проводки повинні забезпечувати безперешкодне і своєчасне проходження імпульсів з мінімальним запізненням.

Метод монтажу, випробувань і приймання трубних проводок залежить від їх категорії. Прокладку трубних проводок слід виконувати по найкоротших відстанях від забірних і приймальних пристроїв до вимірювальних перетворювачів та приладів, паралельно стінам, перекриттям, колонкам тощо. Трубопроводні лінії повинні бути розташовані з мінімальною кількістю поворотів і перетинів, в місцях, що легко доступні для монтажу та обслуговування, при цьому уникати зон з різкими коливаннями температури, вібраціями та механічними пошкодженнями.

5.4 Налагоджування системи автоматичного регулювання температури газону

Перевірку цілісності блоків необхідно проводити перед монтажем, під час планового ремонту, а також у разі виявлення пошкоджень під час експлуатації системи. Підлягають перевірці: основна похибка спрацювання вторинного приладу, основна похибка запису, варіація та поріг чутливості приладу, робота механізму установки робочого струму, сигналізація про "обрив в ланцюзі приладу", рівень перешкод на вході електронного підсилювача, а також ступінь нагріву деталей під час тривалої роботи системи. Перевірка приладів повинна проводитись за таких умов: температура навколишнього середовища 20 ± 5°С, напруга живлення не повинна відрізнятися від номінальної більш ніж на 3%, частота струму живлення — 50 ± 0,5 Гц, за відсутності сторонніх магнітних полів.

ВИСНОВКИ

Метою цієї магістерської роботи було поліпшення якості газону футбольного поля та підтримання його оптимального стану протягом року шляхом розробки системи автоматичного регулювання температури теплоносія, що обігріває ґрунт стадіону. Система автоматично коригує подачу палива в котел у разі відхилення заданого технологічного параметру від встановленого значення, що дозволяє точно контролювати температуру теплоносія та покращити умови роботи для обслуговуючого персоналу.

У процесі виконання роботи було проведено загальний аналіз теплового господарства стадіону. З'ясовано, що на рівні патентів існує кілька пропозицій щодо засобів підігріву ґрунту газону.

Для забезпечення автоматизації процесу підігріву газону був проведений огляд існуючих засобів вимірювання температури. На основі цього аналізу було обґрунтовано принцип побудови системи, що підтримує оптимальну температуру ґрунту газону, автоматично регулюючи подачу палива до котла у разі відхилення температурного режиму теплоносія. Система включає чутливий елемент, який безпомилково реагує на зміни температури теплоносія. Оскільки сигнал від цього елемента може бути недостатньо сильним для обробки мікроконтролером, передбачається його підсилення до рівня, що забезпечує належну точність для подальшої обробки. У розробленій системі саме мікроконтролер здійснює зчитування сигналів з блоку сенсорів і генерує відповідний керуючий вплив, який активує пускач електродвигуна регулятора подачі палива, забезпечуючи таким чином автоматичне коригування температури теплоносія в реальному часі.

У розробленій системі було визначено її структуру, принцип регулювання, а також спроектовано функціональну та електричну принципову схему слабкострумової частини. Для підтвердження працездатності системи були виведені передаточні функції для замкнутої та розімкнутої системи, а також сформульовано характеристичне рівняння. Система була розглянута як неперервна, оскільки зміни температури теплоносія відбуваються поступово, і

швидкодії мікропроцесорного блоку достатньо для своєчасного реагування на коливання параметра. В рамках роботи було проведено дослідження стійкості системи, що показало, що вона є стійкою за заданих вихідних параметрів.

Для детальнішого аналізу стійкості системи було побудовано область стійкості в площині коефіцієнта підсилення підсилювача. Це дозволило виявити чутливість системи до змін цього параметра та визначити оптимальні умови для її стабільної роботи. Під час тестування без корекції система продемонструвала незадовільні показники якості, зокрема, спостерігалися коливання температури теплоносія, що не відповідали заданим параметрам, а також деяке спотворення сигналів при зворотному зв'язку.

З метою покращення характеристик системи було проведено синтез послідовного коректуючого пристрою, який дозволяє змінювати параметри системи таким чином, щоб забезпечити необхідну точність і стабільність регулювання. Введення цього коректуючого пристрою забезпечило стабілізацію роботи системи, зменшення впливу коливань на вихідні параметри та покращення часового відгуку системи.

Розроблений коректуючий пристрій здійснює динамічне коригування параметрів підсилювача, що дає змогу підтримувати температуру теплоносія в заданих межах, знижуючи ймовірність відхилень від оптимальних значень. Це дозволяє забезпечити стабільне і точне регулювання температури ґрунту на футбольному полі протягом року, підвищуючи ефективність роботи системи та її здатність до адаптації до змін умов експлуатації.

У магістерській роботі також розглянуті аспекти монтажу, налагодження та експлуатації розробленої системи.

У розділі охорони праці були проведені розрахунки захисного заземлення агрегату, зокрема визначено довжину горизонтального заземлювача та кількість вертикальних заземлювачів. Також було враховано експлуатаційні вимоги, що відповідають законодавчим нормам України щодо охорони праці.

Перелік скорочень, символів та спеціальних термінів

КВП – контрольно-вимірювальні прилади;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ВБ – вимірювальний блок;

ПП – підсилювач потужності;

ЛАЧХ – логарифмічна амплітудно-частотна характеристика;

ТУ – технічні умови;

ДНАОП – державні нормативні акти про охорону праці;

ПУЕ – правила улаштування електроустановок;

САР – система автоматичного регулювання;

ЛСА – локальна система автоматики;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;

МК – мікроконтролер;

ОР – об’єкт регулювання;

АФЧХ – амплітудно-фазова частотна характеристика;

ЛФЧХ – логарифмічна фазова-частотна характеристика;

ІМС – інтегральна мікросхема;

САННіП – санітарні норми і права;

БНіП – будівельні норми і правила;

НДДКР – науково-дослідні та дослідно-конструкторські роботи.

Список літератури

1. Футбол. Круглий рік. - Рекламний проспект. Київ, 1992.

2. Авт.св. СРСР N 717208, кл. Е 01 С 13/00. Плохін П.І. Штучна крижана доріжка. 1980

3. Авт.св. СРСР N 1482990 кл. Е 01 С 11/24. Витчіков Ю.С., Лукс А.Л., Лукс А.А і Мельникова Л. І. Автомобільна дорога. 1989.

4. Авт.св. СРСР N 363461, кл. А 01 g 9/24. Обладнання для підтримки технологічного режиму культурного шару ґрунту в теплицях. Кисленко Н.К., Посилкіна А.І., Терпигорєв В.А., Штрейс Р.І. та Шаку Л.І. 1972.

5. Патент СРСР N 528849 , кл. А 01 G 9/24. Пристрій для обігріву захищеного ґрунту. Жан-Лен Даль, Моріс Дюмон, Андре Фуршом, Еме Фрейше і Андре Гузі (Франція). Фірма, "Комісаріат а л'Енержі Атомік" (Франція), 1976.

6. Авт.св. СРСР N 676227, кл. А 01 G 9/24. Губкін В.К., Шейкін Ю.Г. та Клімов В.В. Спосіб обігріву ґрунту при поливі . 1979.

7. Авт.св . СРСР N 1021417, кл. А 01 G 9/24, Е 02 В 11/00. Старостін Є.Г. Пристрій для дренування та обігріву. 1983.

8. Бородін І.Ф. та ін Основи автоматики і автоматизації виробничих процесів. - М.: Колос, 1977, С. 57-62.

9. Авт.св. СРСР N 1028281, кл. А 01 G 9/24. Михайленко І.М. і Судаченко В.М. Пристрій для обігріву ґрунту. 1983.

10. Гребнев В.В. Микроконтроллеры семейства AVR фирмы Atmel. – М.: ИП РадиоСофт, 2002 – 176с.

11. Дж. Маркус. Схемы электронной автоматики. Издательство иностранной литературы, 1962. – 186 с.

12. Кондратець В.О. Теорія і технічні засоби систем: Підручник. – К.: Вища шк., 1993. – 319 с.

13. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – К.: Либідь, 1997. – 544 с.

14. В.А. Шафрановский Справочник наладчика автоматики котельных установок Симферополь «Таврия» 1987.

15. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці. Підручник. – Вид. 3-є, перероб і доп. / В. Ц. Жидецький. – Львів: УАД, 2006. – 336 с.

16. Практикум з охорони праці. / [Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І.]. – Львів: Афіша, 2000. – 352 с.

17. Босов Є. П. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва: Навчальний посібник. / Є. П. Босов, Р. В. Жесан, В. М. Каліч. – Кіровоград: КНТУ, 2007. – 112 с.

18. Конституція України. – К.: Вид-во Паливода А. В., 2019. – 76 с.

19. Закон України «Про охорону праці» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12.

20. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80.